

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
спеціальностей 144 «Теплоенергетика» та
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Джерела енергії: Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальностей 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Дубровська, В.І Шкляр. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 71 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 2 від 31.10.2019 р.)*

*за поданням Вченої ради Інституту енергозбереження та енергоменеджменту
(протокол № 3 від 30.09.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ

ПРАКТИКУМ

Укладачі: *Дубровська Вікторія Василівна*, канд. техн. наук, доц.,
Шкляр Віктор Іванович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор *Недбайло О.М.*, д-р. техн. наук, ст. наук. співробітник

Рецензент: *Закладний О.О.*, канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання, Інституту енергозбереження та енергоменеджменту

В навчальному посібнику наведено задачі з розв'язками за основними темами з дисципліни «Енергетичні системи та комплекси 1. Джерела енергії». Кожна тема включає теоретичну частину, яка дає визначення основних понять, формули і пояснення до них.

Навчальний посібник призначений для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© В.В. Дубровська, В.І. Шкляр, 2019
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ПАЛИВО	5
1.1 Склад палива	5
1.2 Горіння палива	9
1.3 Теплота згорання палива	13
1.4 Теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання палива	15
1.5 Складання теплового балансу та визначення ККД котельного агрегату	19
2 ПАРОТУРБІННІ УСТАНОВКИ	29
3 КОМПРЕСОРИ	39
4 ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ	44
5 ГАЗОВІ ТУРБІНИ	50
6 КОНДЕСАЦІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ....	55
6.1 Роздільний спосіб енерговиробництва.....	55
6.2 Комбінований спосіб енерговиробництва	57
ЛІТЕРАТУРА	64
ДОДАТОК 1 Теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання палива	65
ДОДАТОК 2 h-s діаграма води і водяної пари	67
ДОДАТОК 3 Термодинамічні властивості води та водяної пари в стані насичення (за температурами)	68
ДОДАТОК 4 Термодинамічні властивості води та водяної пари в стані насичення (за тиском)	70

ВСТУП

Дисципліна «Енергетичні системи та комплекси 1. Джерела енергії» формує теоретичну базу для засвоєння дисциплін професійної та практичної підготовки за спеціальністю «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Посібник містить основні розрахункові формули і докладні розв'язки типових задач курсу «Джерела енергії» [1-3] за розділами: паливо, процеси горіння, котельні установки, парові турбіни, двигуни внутрішнього згорання, газові турбіни, компресори та теплові електричні станції.

Посібник розрахований на студентів стаціонарної та заочної форм навчання для самостійної роботи з дисципліни, а також для роботи на практичних заняттях з цього курсу, які проводяться під керівництвом викладача.

Посібник може бути використаний при виконанні розрахункової або курсової роботи та дипломного проекту.

1 ПАЛИВО

1.1 Склад палива

Паливом називаються хімічні сполуки, в результаті горіння яких виділяється теплота, яку економічно доцільно використовувати для промислових та побутових потреб [1 – 2].

Тверде і рідке органічне паливо (табл. 1.1) складається з хімічних сполук вуглецю С, водню Н, сірки S, кисню О, азоту N, вологи W і негорючих твердих (мінеральних) домішок, що утворюють золу А.

Природний газ є сумішшю горючих (вуглеводнів C_nH_m (насичених C_nH_{2n+2} та ненасичених C_nH_{2n}), H_2 , CO та H_2S) та негорючих газів (N_2 , CO_2 , O_2). Складається переважно з метану $CH_4=85-98\%$.

Розрахунки спалювання палива виконують на підставі його елементарного складу і технічного аналізу.

Елементарний склад палива буває: органічний, сухий, робочий та горючий (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 Паливні маси

Позначення	C	H	O	N	S		A	W
					S _{op} +S _c	S _к		
Органічна	C ^O + H ^O + O ^O + N ^O + S ^O =100%							
Горюча	C ^Г + H ^Г + O ^Г + N ^Г + S ^Г =100%							
Суха	C ^C + H ^C + O ^C + N ^C + S ^C + A ^C =100%							
Робоча	C ^P + H ^P + O ^P + N ^P + S ^P + A ^P + W ^P =100%							

Розрахунки процесів горіння у топках котлів проводять за робочою масою палива. Перерахування з однієї маси палива на іншу проводиться за допомогою множників (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 Множники для перерахування складу палива з одного стану в інший

Задана маса	Маса, яку шукаємо			
	органічна	горюча	суха	робоча
Органічна	1	$\frac{100 - S_{\text{Л}}^{\Gamma}}{100}$	$\frac{100 - (S_{\text{Л}}^{\Gamma} + A^{\text{C}})}{100}$	$\frac{100 - (S_{\text{Л}}^{\Gamma} + A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}{100}$
Горюча	$\frac{100}{100 - S_{\text{Л}}^{\Gamma}}$	1	$\frac{100 - A^{\text{C}}}{100}$	$\frac{100 - (A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}{100}$
Суха	$\frac{100}{100 - (S_{\text{Л}}^{\Gamma} + A^{\text{C}})}$	$\frac{100}{100 - A^{\text{C}}}$	1	$\frac{100 - W^{\text{P}}}{100}$
Робоча	$\frac{100}{100 - (S_{\text{Л}}^{\Gamma} + A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}$	$\frac{100}{100 - (A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}$	$\frac{100}{100 - W^{\text{P}}}$	1

Задача 1.1 Визначити склад робочої маси донецького вугілля, якщо елементарний склад його горючої маси: $C^{\Gamma} = 75,5\%$, $H^{\Gamma} = 5,5\%$, $S_{\text{Л}}^{\Gamma} = 4,2\%$, $N^{\Gamma} = 1,6\%$, $O^{\Gamma} = 12,2\%$, $A^{\text{C}} = 18\%$, $W^{\text{P}} = 13\%$.

$$C^{\Gamma} = 75,5\%$$

$$H^{\Gamma} = 5,5\%$$

$$S_{\text{Л}}^{\Gamma} = 4,2\%$$

$$N^{\Gamma} = 1,6\%$$

$$O^{\Gamma} = 12,2\%$$

$$A^{\text{C}} = 18\%$$

$$W^{\text{P}} = 13\%$$

$$C^{\text{P}} - ? \quad H^{\text{P}} - ?$$

$$S^{\text{P}} - ? \quad N^{\text{P}} - ?$$

$$A^{\text{P}} - ? \quad O^{\text{P}} - ?$$

1. Зольність робочої маси палива визначаємо за формулами табл. 1.2:

$$A^{\text{P}} = A^{\text{C}} \frac{100 - W^{\text{P}}}{100} = 18 \frac{100 - 13}{100} = 15,7\%.$$

2. Перерахунок елементарного складу палива з горючої маси на робочу проводиться за формулою (табл. 1.2):

$$x^{\text{P}} = x^{\Gamma} \frac{100 - (A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}{100}.$$

$$C^{\text{P}} = C^{\Gamma} \frac{100 - (A^{\text{P}} + W^{\text{P}})}{100} = 75,5 \frac{100 - (15,7 + 13)}{100} = 53,8\%.$$

$$H^{\text{P}} = 5,5 \frac{100 - (15,7 + 13)}{100} = 3,9\%.$$

$$S_{\text{Л}}^{\text{P}} = 4,2 \frac{100 - (15,7 + 13)}{100} = 3\%.$$

$$N^{\text{P}} = 1,6 \frac{100 - (15,7 + 13)}{100} = 1,14\%.$$

$$O^{\text{P}} = 12,2 \frac{100 - (15,7 + 13)}{100} = 9,4\%.$$

$$W^{\text{P}} = 13\%.$$

Для перевірки точності проведених розрахунків просумуємо складові частини робочої маси палива:

$$C^P + H^P + S_{\text{л}}^P + N^P + O^P + A^P + W^P = 100\%.$$

Задача 1.2 Визначити склад робочої маси вугілля, якщо елементарний склад його горючої маси: $C^{\Gamma} = 71,5\%$, $H^{\Gamma} = 5,2\%$, $S_{\text{л}}^{\Gamma} = (S_{\text{оп}}^{\Gamma} + S_{\text{к}}^{\Gamma}) = 2,7\%$, $N^{\Gamma} = 1,7\%$, $O^{\Gamma} = 18,9\%$, а вологість робочої маси $W^P = 17\%$, зольність сухої маси $A^C = 34\%$.

$C^{\Gamma} = 71,5\%$	1. Зольність робочої маси палива визначаємо за формулами табл.1.1:
$H^{\Gamma} = 5,2\%$	$A^P = A^C \frac{100 - W^P}{100} = 34 \frac{100 - 17}{100} = 28,2 \%$
$S_{\text{л}}^{\Gamma} = (S_{\text{оп}}^{\Gamma} + S_{\text{к}}^{\Gamma}) = 2,7\%$	2. Перераховуємо компоненти палива з горючої маси на робочу з використанням розрахованого коефіцієнту:
$N^{\Gamma} = 1,7\%$	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100} = \frac{100 - (28,2 + 17)}{100} = 0,548,$
$O^{\Gamma} = 18,9\%$	$C^P = C^{\Gamma} \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} = 71,5 \cdot 0,548 = 39,2\%,$
$W^P = 17\%$	$H^P = 5,2 \cdot 0,548 = 2,8\%,$
$A^C = 34\%$	$S_{\text{л}}^P = 2,7 \cdot 0,548 = 1,5\%,$
$C^P - ? \quad H^P - ? \quad S^P - ?$	$N^P = 1,7 \cdot 0,548 = 0,9\%,$
$N^P - ? \quad A^P - ? \quad O^P - ?$	$O^P = 18,9 \cdot 0,548 = 10,4\%.$

Для перевірки проведених розрахунків просумуємо складові частини елементарної робочої маси палива:

$$C^P + H^P + S_{\text{л}}^P + N^P + O^P + A^P + W^P = 39,2 + 2,8 + 1,5 + 0,9 + 10,4 + 28,2 + 17 = 100\%.$$

Перерахунок на іншу вологість

Задача 1.3 Визначити склад робочої маси палива, якщо в таблиці вказаний склад: $C^P = 38,6\%$, $H^P = 2,6\%$, $S^P = 3,8\%$, $N^P = 0,8\%$, $O^P = 3,1\%$, $W^P = 11\%$, $A^P = 40,1\%$, а технічний аналіз показав, що дійсна вологість складає $W_1^P = 16\%$.

$C^P = 38,6\%$ $H^P = 2,6\%$ $S^P = 3,8\%$ $N^P = 0,8\%$ $O^P = 3,1\%$ $W^P = 11\%$ $A^P = 40,1\%$ $W_1^P = 16\%$	1. Перерахунок елементарного складу палива з однієї вологості на іншу проводиться за формулою: $x_1^P = x^P \frac{100 - W_1^P}{100 - W^P}.$ $C_1^P = 38,6 \frac{100 - 16}{100 - 11} = 38,6 \cdot 0,9438 = 36,43\%.$ $H_1^P = 2,6 \cdot 0,9438 = 2,45\%.$ $S_1^P = 3,8 \cdot 0,9438 = 3,586\%.$ $N_1^P = 0,8 \cdot 0,9438 = 0,755\%.$ $O_1^P = 3,1 \cdot 0,9438 = 2,926\%.$ $A_1^P = 40,1 \cdot 0,9438 = 37,84\%.$
$C_1^P - ?, H_1^P - ?,$ $S_1^P - ?, N_1^P - ?,$ $A_1^P - ?, O_1^P - ?.$	

Задача 1.4 У топці котельного агрегату спалюється суміш різних видів палив, яка складається з 400 кг кам'яного вугілля складу: $C_1^P = 57\%$, $H_1^P = 3,4\%$, $(S_{л1}^P) = 0,8\%$, $N_1^P = 0,9\%$, $O_1^P = 5,4\%$, $A_1^P = 25\%$, $W_1^P = 7,5\%$ та 600 кг кам'яного вугілля складу: $C_2^P = 52,7\%$, $H_2^P = 3,9\%$, $(S_{л2}^P) = 4,6\%$, $N_2^P = 0,9\%$, $O_2^P = 6,3\%$, $A_2^P = 26,6\%$, $W_2^P = 5\%$. Визначити елементарний склад робочої маси суміші палив.

400 кг	600 кг	1. Масова частка одного з палив у суміші знаходиться за формулою:
$C_1^P = 57\%$;	$C_2^P = 52,7\%$;	$\epsilon_1 = \frac{B_1}{B_1 + B_2}$; $\epsilon_2 = 1 - \epsilon_1$; $x^P = x_1^P \epsilon_1 + x_2^P (1 - \epsilon_1).$
$H_1^P = 3,4\%$;	$H_2^P = 3,9\%$;	$\epsilon_1 = \frac{B_1}{B_1 + B_2} = \frac{400}{400 + 600} = 0,4.$
$S_{л1}^P = 0,8\%$;	$S_{л2}^P = 4,6\%$;	2. Тоді елементарний склад робочої суміші палива визначається:
$N_1^P = 0,9\%$;	$N_2^P = 0,9\%$;	$C_{CM}^P = \epsilon_1 C_1^P + (1 - \epsilon_1) C_2^P = 0,4 \cdot 57 + (1 - 0,4) \cdot 52,7 = 54,4\%$
$O_1^P = 5,4\%$;	$O_2^P = 6,3\%$;	$H_{CM}^P = 0,4 \cdot 3,4 + (1 - 0,4) \cdot 3,9 = 3,7\%$
$A_1^P = 25\%$;	$A_2^P = 26,6\%$;	$S_{лCM}^P = 0,4 \cdot 0,8 + (1 - 0,4) \cdot 4,6 = 3,1\%$
$W_1^P = 7,5\%$	$W_2^P = 5\%$	$N_{CM}^P = 0,4 \cdot 0,9 + (1 - 0,4) \cdot 0,9 = 0,9\%$
$C_{CM}^P - ?, H_{CM}^P - ?,$		$O_{CM}^P = 0,4 \cdot 5,4 + (1 - 0,4) \cdot 6,3 = 5,9\%.$
$S_{CM}^P - ?, N_{CM}^P - ?,$		$A_{CM}^P = 0,4 \cdot 25 + (1 - 0,4) \cdot 26,6 = 26\%.$
$A_{CM}^P - ?, O_{CM}^P - ?.$		$W_{CM}^P = 0,4 \cdot 7,5 + (1 - 0,4) \cdot 5 = 6\%.$

Перевірка:

$$54,4 + 3,7 + 3,1 + 0,9 + 5,9 + 26 + 6 = 100\%.$$

1.2 Горіння палива

Горіння - це хімічний процес з'єднання окислювача з горючими елементами палива, що супроводжується інтенсивним виділенням теплоти і значним підвищенням температури.

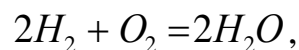
Під час горіння твердого палива протікають наступні основні реакції:

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Вуглець до діоксиду вуглецю | $C + O_2 \rightarrow CO_2 + 31 \text{ МДж/кг C.}$ |
| 2. Вуглець до оксиду вуглецю | $2C + O_2 \rightarrow 2CO + 9,92 \text{ МДж/кг C.}$ |
| 3. Оксид вуглецю до діоксиду вуглецю | $2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 + 10,14 \text{ МДж/кг CO.}$ |
| 4. Водень до водяної пари | $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 120 \text{ МДж/кг H.}$ |
| 5. Сірка до діоксиду сірки | $S + O_2 \rightarrow SO_2 + 9,3 \text{ МДж/кг S.}$ |

Всі розрахунки процесу горіння палива проводяться на 1 кг твердого і рідкого палива або на 1 м³ газоподібного палива за н. у. ($p_{н.у.} = 101325 \text{ Па (760 мм рт.ст)}$, $T_{н.у.} = 273 \text{ К}$) і зводяться до визначення об'єму повітря, необхідного для горіння палива, складу і об'єму газоподібних продуктів та їх ентальпій.

Задача 1.5 Визначити скільки необхідно подати кисню, щоб спалити 1 кг H₂?

I. Запишемо відповідну реакцію окислення при повному згорянні водню:



$$4 \text{ кг } H_2 + 32 \text{ кг } O_2 = 36 \text{ кг } H_2O,$$

на одиницю маси горючого елемента:

$$1 \text{ кг } H_2 + 8 \text{ кг } O_2 = 9 \text{ кг } H_2O.$$

Таким чином, при повному згорянні 1 кг водню необхідно 8 кг кисню і при цьому утворюється 9 кг водяної пари.

II. Як правило, кількість необхідного кисню визначають в об'ємних одиницях.

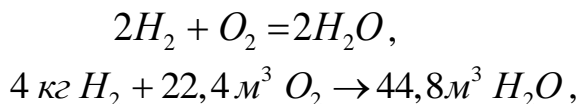
Об'єм 1 кмоль для всіх ідеальних газів за н. у. дорівнює 22,4 м³.

Продукти згоряння вважаємо ідеальними газами (при високих температурах і малих тисках можна знехтувати силами притягання і об'ємами самих молекул).

Питомий об'єм будь-якого ідеального газу за н.у.:

$$v_{H.Y.} = \frac{22,4}{\mu} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Тоді:



на одиницю маси горючого елемента:



При повному згорянні 1 кг водню необхідно 5,6 м³ кисню і утворюється 11,2 м³ H₂O.

III. Щоб отримати значення кількості необхідного кисню і продуктів згоряння в об'ємних одиницях, можна отримані значення (див. пункт I) розділити на густину відповідного газу:

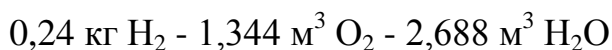
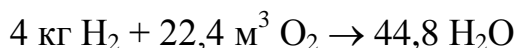
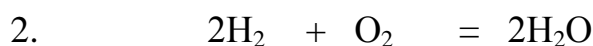
$$\rho_{O_2}^{H.Y.} = 1,429 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \rho_{H_2O} = 0,804 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$1 \text{ кг } H_2 + \frac{8}{1,429} O_2 = \frac{9}{0,804} H_2O$$

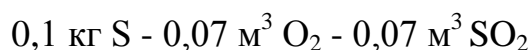
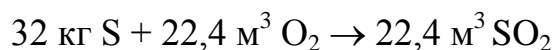
$$\text{або } 1 \text{ кг } H_2 \quad 5,6 \text{ м}^3 O_2 \quad 11,2 \text{ м}^3 H_2O.$$

Задача 1.6 Визначити кількість кисню, яка необхідна для спалювання 1 кг палива, що складається з 0,56 кг С, 0,24 Н, 0,1 кг S і 0,1 кг негорючих матеріалів, та об'єм продуктів згоряння.

0,56 кг С	$\mu_C = 12 \text{ кг/кмоль} ; \mu_S = 32 \text{ кг/кмоль}$
0,24 кг Н	Запишемо відповідні реакції горіння
0,1 кг S	1. $C + O_2 = CO_2$
0,1 кг негорючих матеріалів	$12 \text{ кг } C + 22,4 \text{ м}^3 O_2 \rightarrow 22,4 \text{ м}^3 CO_2$
$\sum V_{O_2} - ? \quad V_{\Gamma} - ?$	$0,56 \text{ кг } C + \frac{22,4}{12} \cdot 0,56 \text{ м}^3 O_2 = \frac{22,4}{12} \cdot 0,56 \text{ м}^3 CO_2$
	$0,56 \text{ кг } C + 1,045 \text{ м}^3 O_2 \rightarrow 1,045 \text{ м}^3 CO_2.$
	$V_{O_2}^C = 1,045 \text{ м}^3; V_{CO_2} = 1,045 \text{ м}^3.$



$$V_{\text{O}_2}^H = 1,344 \text{ м}^3; V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,688 \text{ м}^3.$$



$$V_{\text{O}_2}^S = 0,07 \text{ м}^3; V_{\text{SO}_2} = 0,07 \text{ м}^3.$$

4. Загальна кількість кисню:

$$\sum V_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2}^C + V_{\text{O}_2}^H + V_{\text{O}_2}^S = 1,045 + 1,344 + 0,07 = 2,46 \text{ м}^3 \text{ за н. у.}$$

5. Загальний об'єм продуктів згоряння:

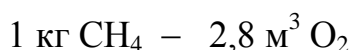
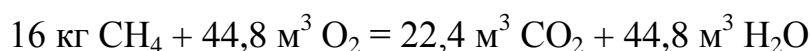
$$V_r = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{SO}_2} = 1,045 + 2,688 + 0,07 = 3,803 \text{ м}^3 \text{ за н. у.}$$

Задача 1.7 За умовою попередньої задачі визначити об'єм повітря, необхідного для горіння палива. Вважаємо, що у повітрі 21% кисню і 79% азоту.

Для визначення теоретично необхідної кількості повітря при спалюванні 1 кг палива, тобто за умови, що весь кисень, який міститься в ньому прореагує при горінні палива, розділимо V_{O_2} на 0,21, бо в повітрі міститься 21% кисню:

$$\frac{V_{\text{O}_2}}{0,21} = \frac{2,46}{0,21} = 11,7 \text{ м}^3 \text{ повітря.}$$

Задача 1.8 Визначити необхідну кількість повітря для спалювання 1 кг CH_4 .



$$V_{\text{O}_2} = 2,8 \text{ м}^3 \quad V_{\text{пов}} = \frac{V_{\text{O}_2}}{0,21} = \frac{2,8}{0,21} = 13,3 \text{ м}^3.$$

Задача 1.9 Визначити об'єм відхідних газів V_r якщо їх температура 700°C , а тиск 1 атм (за умовою задачі 1.6).

Для розв'язку задачі використовуємо рівняння стану ідеальних газів

$$pV_1 = mRT_1, \quad pV_2 = mRT_2 \Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1};$$

$$V_{CO_2}^{700^\circ\text{C}} = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 1,045 \cdot \frac{973}{273} = 3,71 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2O}^{700^\circ\text{C}} = 2,688 \cdot \frac{973}{273} = 9,528 \text{ м}^3;$$

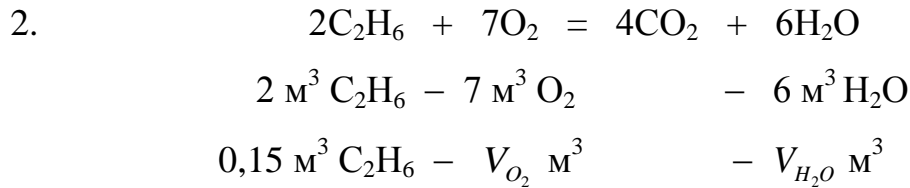
$$V_{SO_2}^{700^\circ\text{C}} = 0,07 \cdot \frac{973}{273} = 0,25 \text{ м}^3.$$

$$V_r = V_{CO_2}^{700^\circ\text{C}} + V_{H_2O}^{700^\circ\text{C}} + V_{SO_2}^{700^\circ\text{C}} = 13,54 \text{ м}^3.$$

Задача 1.10 Визначити об'єм необхідної кількості повітря при спалюванні 1 м^3 газоподібного палива, яке складається з 80% CH_4 , 15% C_2H_6 , 5% C_3H_8 і об'єм утвореної водяної пари.

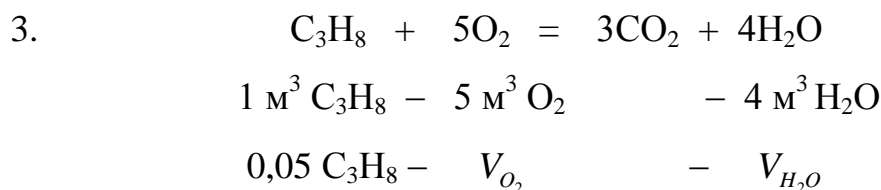
1 м ³ палива	Складаємо відповідні рівняння горіння:
80% → 0,8 м ³ CH ₄ –	1. CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O
15% → 0,15 м ³ C ₂ H ₆	1 кмоль CH ₄ + 2 кмоль O ₂ → 1 кмоль CO ₂ + 2 кмоль H ₂ O
5% → 0,05 м ³ C ₃ H ₈	22,4 м ³ CH ₄ + 44,8 м ³ O ₂ → 22,4 м ³ CO ₂ + 44,8 м ³ H ₂ O
V _{ПОВ} - ?	1 м ³ CH ₄ - 2 м ³ O ₂ - 1 м ³ CO ₂ - 2 м ³ H ₂ O
ΣV _{H₂O} - ?	0,8 м ³ CH ₄ - V _{O₂} м ³ - V _{CO₂} м ³ - V _{H₂O} м ³
	1 м ³ - 2 м ³
	0,8 м ³ - V _{O₂}
	V _{O₂} = $\frac{2 \cdot 0,8}{1} = 1,6 \text{ м}^3;$
	1 м ³ - 2 м ³
	0,8 м ³ - V _{H₂O}
	V _{H₂O} = $\frac{2 \cdot 0,8}{1} = 1,6 \text{ м}^3.$

Аналогічно складаються рівняння горіння для інших горючих компонентів газоподібного палива та визначаються об'єми кисню та водяної пари (V_{O_2} , V_{H_2O}):



$$V_{O_2} = \frac{7 \cdot 0,15}{2} = 0,525 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2O} = \frac{6 \cdot 0,15}{2} = 0,45 \text{ м}^3.$$



$$V_{O_2} = \frac{5 \cdot 0,05}{1} = 0,25 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2O} = \frac{4 \cdot 0,05}{1} = 0,2 \text{ м}^3.$$

$$4. \quad \sum V_{O_2} = 1,6 + 0,525 + 0,25 = 2,375 \text{ м}^3.$$

$$5. \quad \sum V_{H_2O} = 1,6 + 0,45 + 0,2 = 2,25 \text{ м}^3.$$

$$6. \quad V_{\text{пов}} = \frac{2,375}{0,21} = 11,31 \text{ м}^3.$$

1.3 Теплота згорання палива

Розрахунок нижчої теплоти згорання робочої маси твердого або рідкого палива виконується за формулою Менделєєва, МДж/кг:

$$Q_H^P = 0,338C^P + 1,025H^P - 0,1085(O^P - S_{\text{л}}^P) - 0,025W^P.$$

Вищу теплоту згорання робочої маси твердого або рідкого палива розраховують за формулою:

$$Q_B^P = Q_H^P + 0,225H^P + 0,025W^P = 0,338C^P + 1,25H^P - 0,1085(O^P - S_{\text{л}}^P).$$

Нижчу питому теплоту згорання сухої маси газоподібного палива Q_H^C визначають з рівняння, МДж/м³:

$$Q_H^C = 0,3581 CH_4 + 0,6374 C_2H_6 + 1,135 C_3H_8 + 1,1862 C_4H_{10} + 1,461 C_5H_{12} + 0,108 H_2 + 0,1263 CO + 0,234 H_2S.$$

Формули для перерахунку теплоти згорання палива різного складу наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 Формули для знаходження теплоти згорання палива

Заданий склад	Робочий	Горючий	Сухий
Робочий	1	$Q_H^r = \frac{(Q_H^P + 25W^P)100}{100 - (A^P + W^P)}$	$Q_H^c = \frac{(Q_H^P + 25W^P)100}{100 - W^P}$
Горючий	$Q_H^P = Q_H^r \frac{100 - (A^P + W^P)}{100} - 25W^P$	1	$Q_H^c = Q_H^r \frac{100 - A^c}{100}$
Сухий	$Q_H^P = Q_H^c \frac{100 - W^P}{100} - 25W^P$	$Q_H^P = Q_H^c \frac{100}{100 - A^c}$	1

Задача 1.11 Визначити нижчу і вищу теплоту згорання робочої маси палива, якщо відомий його елементарний склад: $C^P = 60,5\%$, $O^P = 12\%$, $H^P = 4,6\%$, $S_{\text{л}}^P = 0,5\%$, $N^P = 0,9\%$, $A^P = 9,5\%$, $W^P = 12\%$.

$C^P = 60,5\%$ $O^P = 12\%$ $H^P = 4,6\%$ $S_{\text{л}}^P = 0,5\%$ $N^P = 0,9\%$ $A^P = 9,5\%$ $W^P = 12\%$	<p>1. Нижча теплота згорання робочої маси палива:</p> $Q_H^P = 338C^P + 1025H^P - 108,5(O^P - S_{\text{л}}^P) - 25W^P =$ $= 338 \cdot 60,5 + 1025 \cdot 4,6 - 108,5(12 - 0,5) - 25 \cdot 12 =$ $= 23616 \text{ кДж} / \text{кг}.$ <p>2. Вища теплота згорання робочої маси палива:</p> $Q_B^P = Q_H^P + 225H^P + 25W^P = 23616 + 225 \cdot 4,6 + 25 \cdot 12 =$ $= 24951 \text{ кДж} / \text{кг}.$
$Q_H^P - ? \quad Q_B^P - ?$	

Задача 1.12 Визначити Q_H^Γ і Q_B^Γ горючої маси малосірчистого мазуту, якщо $Q_H^P = 38,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$, $H^P = 10,4\%$, $A^P = 0,5\%$, $W^P = 3,2\%$.

$Q_H^P = 38,5 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$ $H^P = 10,4\%$ $A^P = 0,5\%$ $W^P = 3,2\%$	<p>1. Кількість водню у горючій масі палива визначаємо за формулою:</p> $H^\Gamma = H^P \frac{100}{100 - (A^P + W^P)} = 10,4 \frac{100}{100 - (0,5 + 3,2)} = 10,8\%.$ <p>2. Нижчу теплоту згоряння горючої маси палива знаходимо за формулою:</p> $Q_H^\Gamma = \frac{Q_H^P + 25W^P}{100 - (A^P + W^P)} \cdot 100 = \frac{38500 + 25 \cdot 3,2}{100 - (0,5 + 3,2)} \cdot 100 = 40062 \text{ кДж} / \text{кг}.$ <p>3. Вища теплота згоряння горючої маси палива дорівнює:</p> $Q_B^\Gamma = Q_H^\Gamma + 225H^\Gamma = 40062 + 225 \cdot 10,8 = 42492 \text{ кДж} / \text{кг}.$
---	--

1.4 Теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання палива

Теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання палива визначають в залежності від виду палива (додаток 1).

Тверде і рідке паливо.

Теоретичний об'єм сухого повітря, необхідний для згорання 1 кг палива обчислюється за формулою, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{ПОВ}}^0 = 0,0889(C^P + 0,375 S_{\text{Л}}^P) + 0,265 H^P - 0,0333 O^P.$$

Теоретичний об'єм сухих трьохатомних газів в продуктах згорання 1 кг палива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{RO}_2} = 0,0187(C^P + 0,375 S_{\text{Л}}^P).$$

Теоретичний об'єм двохатомних газів (азоту) при згоранні 1 кг палива, $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$V_{\text{RO}}^0 = V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 V_{\text{ПОВ}}^0 + 0,008 N^P.$$

Теоретичний об'єм водяної пари, м³/кг:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 H^P + 0,0124 W^P + 0,0161 V_{ПОВ}^0.$$

Газоподібне паливо.

Теоретичний об'єм сухого повітря, необхідний для повного згорання 1 м³ палива визначають за рівнянням, м³/ м³:

$$V_{ПОВ}^0 = 0,0478 \left[\sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n + 0,5 H_2 + 0,5 CO + 1,5 H_2 S - O_2 \right],$$

де m і n – число атомів відповідно вуглецю і водню в хімічній формулі вуглеводнів, які входять до складу даного палива.

При розрахунку в формулу вводять вміст компонентів палива у відсотках за об'ємом.

Теоретичний об'єм трьохатомних газів в продуктах згорання 1 м³ газоподібного палива визначається за формулою, м³/ м³:

$$V_{RO_2} = 0,01 \left(\sum m C_m H_n + CO_2 + CO + H_2 S \right).$$

Теоретичний об'єм двохатомних газів (азоту), м³/ м³:

$$V_{RO}^0 = V_{N_2}^0 = 0,79 V_{ПОВ}^0 + 0,01 N_2.$$

Теоретичний об'єм водяної пари, м³/ м³:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01 \left(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2 + H_2 S + 0,124 \cdot d_{ПАЛ} \right) + 0,0161 \cdot V_{ПОВ}^0,$$

де $d_{ПАЛ}$ - вологовміст палива в сухому газі, кг/м³.

Приймається $d_{ПАЛ} = 10 \cdot 10^{-3}$ кг/м³.

Дійсні об'єми продуктів згорання розраховуються з урахуванням надлишку повітря при $\alpha > 1$ за формулами однаковими для всіх видів палива.

Коефіцієнт надлишку повітря на виході з котла дорівнює:

$$\alpha_{ВДХ} = \alpha_T + \Delta\alpha,$$

де α_T – коефіцієнт надлишку повітря на виході з топки;

$\Delta\alpha$ - сумарний присос повітря по всьому газовому тракту котельного агрегату.

Дійсний об'єм водяної пари у відхідних газах визначають з рівняння:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{ВДХ} - 1)V_{ПОВ}^0.$$

Сумарний об'єм продуктів згорання на виході з котельного агрегату складає:

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha_{ВДХ} - 1)V_{ПОВ}^0.$$

Ентальпія продуктів згорання на виході з котельного агрегату визначається на 1 кг твердого чи рідкого палива або 1 м³ сухого газоподібного палива за формулою, кДж/кг (кДж/м³):

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha_{ВДХ} - 1)H_{ПОВ}^0 + H_3,$$

де H_{Γ}^0 - ентальпія продуктів згорання при $\alpha_T = 1$,

$$H_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} (c' \vartheta_{ВДХ})_{CO_2} + V_{N_2}^0 (c' \vartheta_{ВДХ})_{N_2} + V_{H_2O}^0 (c' \vartheta_{ВДХ})_{H_2O};$$

де $\vartheta_{ВДХ}$ - температура відхідних газів, °C, у відповідності до вихідних даних;

$(c' \vartheta_{ВДХ})_{CO_2}, (c' \vartheta_{ВДХ})_{N_2}, (c' \vartheta_{ВДХ})_{H_2O}$ - середні питомі об'ємні ентальпії газів,

що входять до складу продуктів згорання, обирають в залежності від їх температури з табл.1.3, кДж/м³;

$H_{ПОВ}^0$ - ентальпія теоретичного об'єму повітря при температурі $\vartheta_{ВДХ} = t_{ВДХ}$, кДж/кг (кДж/м³):

$$H_{ПОВ}^0 = V_{ПОВ}^0 (c' t_{ВДХ})_{ПОВ},$$

$(c' t_{ВДХ})_{ПОВ}$ - середня питома об'ємна ентальпія повітря (табл. 1.4), кДж/м³;

H_3 - ентальпія летючої золи у продуктах згорання (для твердого палива), кДж/кг:

$$H_3 = \frac{A^P a_{УН}}{100} (c \vartheta_{ВДХ})_3,$$

де $a_{УН}$ - частка золи палива, що виноситься з топки відхідними газами;

$(c \vartheta_{ВДХ})_3$ - середня питома ентальпія золи у продуктах згорання в залежності від її температури, кДж/кг.

Таблиця 1.4 Ентальпії повітря, газів та золи

ϑ	$(c' t)_{\text{ПОВ}}$	$(c' \vartheta)_{\text{CO}_2}$	$(c' \vartheta)_{\text{N}_2}$	$(c' \vartheta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(c' \vartheta)_{\text{O}_2}$	$(c \vartheta)_3$
$^{\circ}\text{C}$	кДж/м ³					кДж/кг
30	39					
100	132	169	130	151	132	81
150	199	263	195	227	200	135
200	266	357	260	304	267	169
250	334	458	326	383	337	217
300	403	559	395	463	407	264
350	472	665	459	544	479	312
400	542	772	527	626	551	360
500	685	997	665	795	700	459
600	830	1222	804	967	850	561
800	1130	1704	1093	1335	1160	768
1000	1436	2202	1394	1725	1478	984
1200	1754	2717	1695	2131	1800	1206
1500	2239	3504	2164	2779	2294	

Задача 1.13 Визначити ентальпію продуктів згоряння на виході з топки, які отримуються при повному спалюванні 1 кг кам'яного вугілля складу: $C^P = 57\%$, $O^P = 5,4\%$, $H^P = 3,4\%$, $W^P = 7,5\%$, $S_{\text{Л}}^P = 0,8\%$, $A^P = 25\%$, $N^P = 0,9\%$. Температура газів на виході з топки дорівнює 1000°C , коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_T = 1,3$, частка золи палива, що виноситься продуктами згоряння $a_{\text{УН}} = 0,85$.

$C^P = 57\%$	1. Ентальпія продуктів повного згоряння дорівнює:
$O^P = 5,4\%$	$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^o + (\alpha_T - 1)H_{\text{ПОВ}}^o + H_3$
$H^P = 3,4\%$	$H_{\Gamma} = V_{\text{RO}_2} (c\vartheta)_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^o (c\vartheta)_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^o (c\vartheta)_{\text{H}_2\text{O}} + (\alpha_T - 1)V^o (c\vartheta)_{\text{ПОВ}} +$
$W^P = 7,5\%$	$+ \frac{A^P \cdot a_{\text{УН}}}{100} (c\vartheta)_3.$
$S_{\text{Л}}^P = 0,8\%$	2. Визначаємо теоретично необхідну кількість повітря:
$A^P = 25\%$	$V^o = 0,0889(C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P) + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot O^P =$
$N = 0,9\%$	$= 0,0889(57 + 0,375 \cdot 0,8) + 0,265 \cdot 3,4 - 0,0333 \cdot 5,4 = 5,815 \text{ м}^3.$
$t_{\text{ВІД}} = 1000^{\circ}\text{C}$	3. Об'єм трьохатомних газів:
$\alpha_T = 1,3$	$V_{\text{RO}_2} = 0,01866(C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P) = 0,01866(57 + 0,375 \cdot 0,8) = 1,07 \text{ м}^3 / \text{кг}.$
$a_{\text{УН}} = 0,85$	
$H_{\Gamma} - ?$	

4. Теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot V^o + 0,008 \cdot N^P = 0,79 \cdot 5,82 + 0,008 \cdot 0,9 = 4,64 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

5. Теоретичний об'єм водяної пари:

$$V_{H_2O}^o = 0,0124(9H^P + W^P) + 0,0161 \cdot V^o = 0,0124(9 \cdot 3,4 + 7,5) + 0,0161 \cdot 5,82 = 0,566 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

6. За таблицю 1.3 знаходимо відповідні значення ентальпій:

$$(c\vartheta)_{CO_2} = 2202 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; (c\vartheta)_{N_2} = 1394 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; (c\vartheta)_{H_2O} = 1725 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}; (c\vartheta)_{ПОВ} = 1436 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$(c\vartheta)_3 = 984 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

7. Ентальпія продуктів повного згоряння при $t_{ВД}=1000^\circ\text{C}$ дорівнює:

$$H_{\Gamma} = V_{RO_2} (c\vartheta)_{RO_2} + V_{N_2}^o (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^o (c\vartheta)_{H_2O} + (\alpha_T - 1)V^o (c\vartheta)_{ПОВ} + \frac{A^P \cdot a_{\text{вн}}}{100} (c\vartheta)_3 =$$

$$= 1,07 \cdot 2202 + 4,605 \cdot 1394 + 0,566 \cdot 1725 + 5,826 \cdot 1436(1,3 - 1) + \frac{25 \cdot 0,85}{100} = 12538 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

1.5 Складання теплового балансу та визначення ККД котельного агрегату

Повнота використання теплоти палива в котельному агрегаті (КА) визначається його коефіцієнтом корисної дії бруто - $\eta_{КА}^{BP}$, який є відношенням корисно використаної в КА теплоти Q_1 до наявної теплоти згоряння палива Q_P^P :

$$\eta_{КА}^{BP} = \frac{Q_1}{Q_P^P} 100\% \text{ - за прямим балансом.}$$

Для одержання к.к.д. складається рівняння теплового балансу КА. Тепловим балансом називається рівність між кількістю теплоти, внесеної в КА - наявна теплота - Q_P^P , і сумою корисно використаної теплоти Q_1 й теплових втрат $\sum_{i=2}^6 Q_i$:

$$Q_P^P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_1 + \sum_{i=2}^6 Q_i.$$

Тепловий баланс складається на 1 кг твердого та рідкого або на 1 м³ газоподібного палива для сталого режиму роботи КА.

Якщо Q_p^p прийняти за 100%, то тепловий баланс можна записати у відсотках:

$$100\% = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6,$$

де:

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_p^p} 100\%.$$

У лівій частині рівняння наявна теплота Q_p^p визначається за формулою:

$$Q_p^p = Q_H^p + Q_{ф.пал} + Q_{в.пов} + Q_{ф} - Q_K,$$

де Q_H^p – нижча теплота згоряння робочого палива;

$Q_{ф.пал}$ – фізична теплота палива (враховується, якщо паливо підігріте поза КА):

$$Q_{ф.пал} = c_{p\text{ пал}} \cdot t_{пал},$$

де $c_{p\text{ пал}}$ – теплоємність робочої маси палива;

$t_{пал}$ – температура палива на вході у топку.

При використанні мазуту його питому теплоємність визначають за формулою, кДж/(кг·°C):

$$c_{pM} = 1,74 + 0,0025 \cdot t_M,$$

де t_M – температура мазуту.

Для вологих твердих палив в літній період часу приймають $t_{пал} = 20^\circ\text{C}$, а теплоємність палива розраховують за формулою:

$$c_{p\text{ пал}} = 0,042 \cdot W^p + c_{пал}^C (1 - 0,01 \cdot W^p), \text{ кДж / (кг} \cdot \text{K)}.$$

Теплоємність сухої маси твердого палива $c_{пал}^C$ складає:

- для бурого вугілля - 1,13 кДж / (кг · K);
- для кам'яного вугілля - 1,09 кДж / (кг · K);
- для антрациту - 0,92 кДж / (кг · K).

$Q_{в.пов}$ – теплота внесена з повітрям, підігрітим поза КА:

$$Q_{в.пов} = \alpha_T \cdot V^0 \cdot c_{пов}' \cdot \Delta t_{пов},$$

де $c'_{\text{пов}}$ - середня об'ємна теплоємність повітря при $p=\text{const}$; при температурах до 300 °С приймають $c'_{\text{пов}}=1,33$ кДж /(м^3 К);

$\Delta t_{\text{пов}}= t^F_{\text{пов}} - t^X_{\text{пов}}$ - різниця температур між підігрітим – $t^F_{\text{пов}}$ і холодним повітрям – $t^X_{\text{пов}}$;

Q_{ϕ} – теплота, внесена парою, яка застосовується для розпилення мазуту:

$$Q_{\phi} = W_{\phi} \cdot (h_{\phi} - 2510),$$

де h_{ϕ} - ентальпія пари, кДж/кг; W_{ϕ} – витрата пари на дуття або розпилення, (кг пари)/(кг мазуту); h_{ϕ} - ентальпія пари, кДж/кг, 2510 – теплота пароутворення води, кДж/кг;

Q_K – теплота, що витрачається на розкладання карбонатів при спалюванні сланців:

$$Q_K = 40,6 \cdot K \cdot (CO_2)_K^P,$$

де K - коефіцієнт розкладання карбонатів. При спалюванні палива в шарі приймається $K=0,7$, при камерному - $K=1$;

$(CO_2)_K^P$ - вміст двоокису вуглецю карбонатів у відсотках робочої маси палива.

Наявна теплота палива Q_P^P у більшості випадків приймається рівною нижчій теплоті його згоряння $Q_P^P = Q_H^P$. Але в ряді випадків враховуються й інші джерела надходження теплоти, якщо вони становлять помітну величину.

Корисно використаною Q_1 називається кількість теплоти, отримана робочим тілом (вода, пара) у КА в розрахунку на 1 кг (м^3) палива, яке спалюється:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{\text{КОР}} = Q_{\text{ВЕ}} + Q_{\text{ВП}} + Q_{\text{ПП}} + Q_{\text{ППП}} + Q_{\text{ПР}} = \\ &= \frac{D}{B} (h_{\text{ПП}} - h_{\text{ЖВ}}^{\text{BX}}) + \frac{D_{\text{ППП}}}{B} (h_{\text{ППП}}^{\text{ВІХ}} - h_{\text{ППП}}^{\text{BX}}) + \frac{D_{\text{ПР}}}{B} (h_{\text{КВ}} - h_{\text{ЖВ}}^{\text{ХВО}}), \end{aligned}$$

де $Q_{\text{ВЕ}}, Q_{\text{ВП}}, Q_{\text{ПП}}, Q_{\text{ППП}}, Q_{\text{ПР}}$ - кількість теплоти, яка підведена до робочого тіла, в водяному економайзері, випарних поверхнях, пароперегрівачі, проміжному пароперегрівачі та теплота на продувку; $h_{\text{ПП}}, h_{\text{ЖВ}}^{\text{BX}}, h_{\text{ЖВ}}^{\text{ХВО}}, h_{\text{КВ}}$ – ентальпії перегрітої пари, живильної води на вході до економайзеру, живильної води на вході до барабану з ХВО, води на лінії насичення при тиску в барабані; $h_{\text{ППП}}^{\text{ВІХ}}, h_{\text{ППП}}^{\text{BX}}$ – ентальпії

пари на виході і вході з проміжного перегрівача, кДж/кг; B – витрата палива, кг/с або м³/с; D_{III} – витрата перегрітої пари на проміжний пароперегрівач, кг/с; D_{PP} – витрата котлової води на продувку парового котла, кг/с.

Загальні втрата теплоти $\sum_{i=2}^6 Q_i$ складаються з суми втрат теплоти:

$Q_2, q_2 = 5-12\%$ – втрати з відхідними газами:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_P^P} 100 = \frac{(H_\Gamma - \alpha_{ВДХ} H_{X.ПОВ}^0)(100 - q_4)}{Q_P^P},$$

де H_Γ – ентальпія відхідних газів;

$H_{X.ПОВ}^0$ – ентальпія холодного повітря при $t_{X.ПОВ}$, кДж/кг (кДж/м³):

$$H_{X.ПОВ}^0 = V_{ПОВ}^0 (c' t_{X.ПОВ})_{ПОВ},$$

де $(c' t_{X.ПОВ})_{ПОВ}$ – ентальпія повітря при температурі $t_{X.ПОВ} = 30^\circ \text{C}$.

$Q_3, q_3 = 0 - 1,5\%$ – втрати від хімічної неповноти згоряння палива (табл. 1.5).

$Q_4, q_4 = 0,5 - 5\%$ – втрати від механічної неповноти згоряння, які пов'язані з недопалом палива в камері згоряння (табл. 1.5).

Для газоподібного й рідкого палива зневажають їх кількістю.

Середнє значення q_3 та q_4 в залежності від типу топки та виду палива обирають за табл. 1.4.

$Q_5, q_5 = 0,4 - 4\%$ – втрати у навколишнє середовище від зовнішнього охолодження поверхні КА. Значення q_5 знаходять з графічної залежності (рис. 1.1).

$Q_6, q_6 = 0-2\%$ – втрати з фізичною теплотою шлаків:

$$q_6 = \frac{a_{ШЛ+ПР} (c' \vartheta)_{ШЛ} A^P}{Q_P^P},$$

де $(c' \vartheta)_{ШЛ}$, кДж/кг – питома ентальпія шлаків, при твердому шлаковидаленні.

Враховуються тільки для палива з великим вмістом золи.

Таблиця 1.5 Основні характеристики топок

Тип топки	Паливо	Коефіцієнт надлишку повітря на виході з топки	Частка золи палива, що виноситься з газами	Втрати теплоти, %	
				Від хімічної неповноти згоряння	Від механічної неповноти згоряння
		α_T	a_{yH}	q_3	q_4
З пневмомеханічними закидачами та нерухомою решіткою	Антрацит	1,6	0,1	0,5	14
	Кам'яне вугілля	1,4	0,15	0,5	8
	Буре вугілля	1,4	0,15	0,5	11
З цепною решіткою прямого ходу	Антрацит	1,6	0,1	0,5	10
З пневмомеханічними закидачами та з цепною решіткою прямого ходу	Кам'яне вугілля	1,3	0,2	1,5	4
	Буре вугілля	1,4	0,17	3,5	5,5
З пневмомеханічними закидачами та з цепною решіткою зворотного ходу	Кам'яне вугілля	1,4	0,17	1	6,5
	Буре вугілля	1,4	0,2	1	6
Пиловугільна	Антрацитовий штиб	1,25	0,95	0	7
	Кам'яне вугілля	1,2	0,95	0,5	5
	Буре вугілля	1,2	0,95	0,5	3
Камерна	Мазут	1,15	—	0,5	0
	Природний газ				

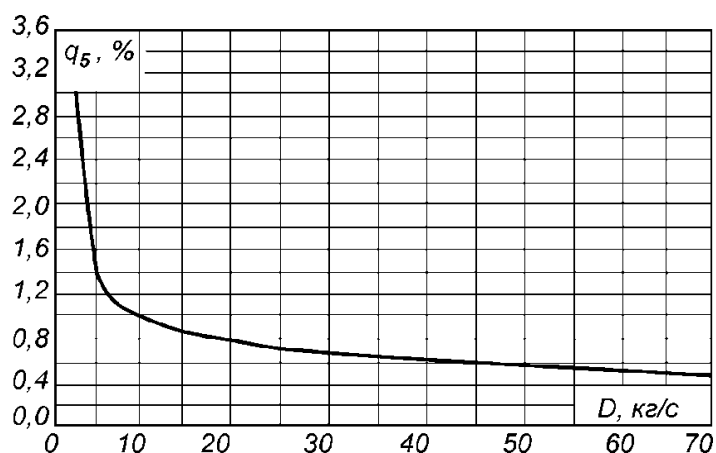


Рисунок 1.1 Втрати теплоти в оточуюче середовище від зовнішнього охолодження котла в залежності від його паропроодуктивності

Коефіцієнт корисної дії бруто можна визначити, якщо знаємо суму теплових втрат при його роботі, тобто **методом зворотного балансу**.

ККД бруто за **зворотним балансом**:

$$q_1 = 100 - \sum_{i=2}^6 q_i = \eta_{KA}^{BP}.$$

ККД нетто визначається з рівняння:

$$\eta_{KA}^{NETTO} = \eta_{KA}^{BP} - \frac{Q_{B\Lambda\Pi}}{B \cdot Q_H^P} 100\%,$$

де $Q_{B\Lambda\Pi}$ – витрата теплоти на власні потреби.

Дійсну витрату палива, що подається у топку котлоагрегату визначають за формулою, кг/с:

$$B = \frac{\left[D(h_{III} - h_{ж.В}) + D_{IIII} (h_{IIII}^{BIX} - h_{IIII}^{BX}) + D_{IP} (h_{K.B} - h_{ж.В}^{XBO}) \right] 100}{Q_P^P \eta_{II}^{BP}} =$$

$$= \frac{D \left[(h_{III} - h_{ж.В}) + g (h_{IIII}^{BIX} - h_{IIII}^{BX}) + \beta (h_{K.B} - h_{ж.В}^{XBO}) \right] 100}{Q_P^P \eta_{II}^{BP}},$$

де $g = \frac{D_{IIII}}{D}$ – відношення витрати пари в проміжному пароперегрівачі до її витрати в основному пароперегрівачі (паропродуктивність котла);

$$\beta = \frac{D_{IP}}{D} 100 - \text{коефіцієнт продувки, \%}.$$

Для порівняння між собою різних видів палива користуються поняттям «умовного палива», теплота згоряння якого дорівнює $Q_{YM} = 29,33 \text{ МДж/кг}$ (**7000 ккал/кг**). Для перерахунку на умовне паливо витрата даного палива повинна бути помножена на тепловий еквівалент E палива:

$$E = \frac{Q_H^P}{Q_{YM}} = \frac{Q_H^P}{29,33}.$$

$$\text{Тоді:} \quad B_{YM} = B \cdot E = B \frac{Q_H^P}{29,33},$$

де B_{YM} , B – витрата умовного та даного палива.

Задача 1.14 В топці котлоагрегату спалюється сірчистий мазут наступного складу: $C^P = 85,3\%$, $O^P = 0,4\%$, $H^P = 10,2\%$, $W^P = 3\%$, $S_{л}^P = 0,5\%$, $A^P = 0,6\%$. Визначити наявну теплоту, якщо температура підігріву мазуту $t_M = 92^\circ\text{C}$. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha_T = 1,3$; повітря підігрівається поза котельним агрегатом до $t''_{\text{пов}} = 170^\circ\text{C}$, температура повітря в котельній $t'_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$. Теплоємність повітря $c'_{\text{пов}} = 1,297 \text{ кДж / м}^3\text{К}$. Ентальпія пари, яка йде на розпилювання палива $h_\Phi = 3280 \text{ кДж/кг}$. Витрата пари на розпилювання паровими форсунками становить $w_\Phi = 0,35 \text{ кг/кг}$.

$$C^P = 85,3\%$$

$$O^P = 0,4\%$$

$$H^P = 10,2\%$$

$$W^P = 3\%$$

$$S_{л}^P = 0,5\%$$

$$A^P = 0,6\%$$

$$t_M = 92^\circ\text{C}$$

$$\alpha_T = 1,3$$

$$t''_{\text{пов}} = 170^\circ\text{C}$$

$$t'_{\text{пов}} = 30^\circ\text{C}$$

$$c'_{\text{пов}} = 1,297 \text{ кДж / м}^3\text{К}$$

$$h_\Phi = 3280 \text{ кДж/кг}$$

$$w_\Phi = 0,35 \text{ кг/кг}$$

$$Q_P^P - ?$$

1. Наявна кількість теплоти визначається за формулою:

$$Q_P^P = Q_H^P + Q_{\Phi, \text{ПАЛ}} + Q_{B, \text{ПОВ}} + Q_\Phi - Q_K.$$

2. Визначаємо нижчу теплоту згоряння палива Q_H^P :

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 0,338C^P + 1,025H^P + 0,1085(S^P - O^P) - 0,025W^P = \\ &= 0,338 \cdot 85,3 + 1,025 \cdot 10,2 + 0,1085(0,5 - 0,4) - 0,025 \cdot 3 = \\ &= 39,22 \text{ МДж / кг}. \end{aligned}$$

3. Визначаємо фізичну теплоту палива $Q_{\Phi, \text{ПАЛ}}$:

$$\begin{aligned} Q_{\Phi, \text{ПАЛ}} &= c_{pM} \cdot t_M = (1,74 + 0,0025t_M)t_M = 92(1,74 + 0,0025 \cdot 92) = \\ &= 0,181 \text{ МДж / кг}, \end{aligned}$$

де теплоємність мазуту $c_p = 1,74 + 0,0025t_M$.

4. Визначаємо теплоту, яка вноситься в топку з повітрям підігрітим поза котельним агрегатом $Q_{B, \text{ПОВ}}$:

$$Q_{B, \text{ПОВ}} = \alpha \cdot V^o \cdot c'_{\text{пов}} \cdot \Delta t_{\text{пов}},$$

де

$$\begin{aligned} V^o &= 0,0899(C^P + 0,375 \cdot S^P) + 0,265H^P - 0,0333O^P = \\ &= 0,0899(85,3 + 0,375 \cdot 0,5) + 0,265 \cdot 10,2 - 0,0333 \cdot 0,4 = 10,387 \text{ м}^3. \end{aligned}$$

$$Q_{B, \text{ПОВ}} = \alpha \cdot V^o \cdot c'_{\text{пов}} \cdot \Delta t_{\text{пов}} = 1,3 \cdot 10,387 \cdot 1,297(170 - 30) = 2452 \text{ кДж}.$$

5. Визначаємо теплоту, яка використовується на розпилювання мазуту Q_Φ :

$$Q_\Phi = W_\Phi(h_\Phi - 2510) = 0,35(3280 - 2510) = 269,5 \text{ кДж / кг}.$$

6. Визначаємо наявну кількість теплоти Q_P^P :

$$Q_P^P = Q_H^P + Q_{\Phi, \text{ПАЛ}} + Q_{B, \text{ПОВ}} + Q_\Phi - Q_K = 39,22 + 0,181 + 2,452 + 0,2695 = 42,122 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$$

Задача 1.15 Визначити теплоту, яка корисно використовується в котлоагрегаті, якщо витрата палива $B=1,2$ кг/с, витрата води $G_B=70$ кг/с, температура води, яка поступає в котел $t_1=70^\circ\text{C}$, а температура води, яка виходить з нього, $t_2=150^\circ\text{C}$.

$B=1,2$ кг/с	1. Для водогрійних котлоагрегатів теплота, яка корисно використовується, визначається за формулою: $Q_1 = \frac{G_B}{B} (h_2 - h_1).$
$G_B=70$ кг/с	
$t_1=70^\circ\text{C}$	
$t_2=150^\circ\text{C}$	
Q_1 - ?	2. За таблицями водяної пари по t_1 і t_2 знаходимо: $h_1=292,97$ кДж/кг; $h_2=632,2$ кДж/кг. 3. Тоді: $Q_1 = \frac{70}{1,2} (632,2 - 292,97) = 19553,3$ кДж / кг

Задача 1.16 У пиловугільній топці котлоагрегату паропродуктивністю $D=5,56$ кг/с спалюється буре вугілля з $Q_H^P=15000$ кДж/кг. Визначити $\eta_{\text{ПГ}}^{\text{БР}}$ і витрату натурального і умовного палив, якщо тиск перегрітої пари $p_{\text{ПГ}}=4$ МПа, температура перегрітої пари $t_{\text{ПГ}}=450^\circ\text{C}$, температура живильної води $t_{\text{ЖВ}}=150^\circ\text{C}$, величина безперервної продувки 3%, втрати теплоти з відхідними газами $q_2=7\%$, втрати з фізичною теплотою шлаків $q_6=0,4\%$.

$D=5,56$ кг/с	1. За таблицею 1.4 знаходимо $q_3=0,5\%$, $q_4=1\%$; а за графіком на рис. 1.1 - $q_5=1,3\%$. 2. ККД брутто котельного агрегату знаходимо за формулою: $\eta_{\text{КА}}^{\text{БР}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) = 100 - (7 + 0,5 + 1 + 1,3 + 0,4) = 89,8\%$. 3. Натуральна витрата палива дорівнює: $B = \frac{D[(h_{\text{ПГ}} - h_{\text{ЖВ}}) + D_{\text{ПР}}(h_{\text{КВ}} - h_{\text{ЖВ}})]}{Q_P^P \cdot \eta_{\text{ПГ}}^{\text{БР}}} \cdot 100 =$ $= \frac{5,56(3330 - 632) + 0,03 \cdot 5,56(1087,5 - 632)}{15000 \cdot 89,8} \cdot 100 = 1,12 \frac{\text{кг}}{\text{с}},$
$Q_H^P=15000$ кДж/кг	
$p_{\text{ПГ}}=4$ МПа	
$t_{\text{ПГ}}=450^\circ\text{C}$	
$t_{\text{ЖВ}}=150^\circ\text{C}$	
$D_{\text{ПР}}=3\%$ D	
$q_2=7\%$	
$q_6=0,4\%$	
$\eta_{\text{КА}}^{\text{БР}}$ - ?, $B_{\text{УМ}}$ - ?	

де $Q_P^P = Q_H^P = 15000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

4. За h-s діаграмою води і водяної пари (Додаток 2) знаходимо значення

$$h_{\text{пп}} = 3330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5. За таблицею води і водяної пари (Додаток 3) знаходимо значення

$$h_{\text{жв}} = 632 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ за температурою } t_{\text{жв}} = 150^\circ\text{C}, \text{ а з додатка 4 за тиском } p_{\text{пп}} = 4 \text{ МПа} -$$

$$h_{\text{кв}} = 1087,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Умовна витрата палива дорівнює:

$$B_{\text{ум}} = \frac{BQ_H^P}{Q_{\text{ум}}} = \frac{1,12 \cdot 15000}{29300} = 0,57 \text{ кг} / \text{с}.$$

Задача 1.17 В топці котла спалюється буре вугілля наступного складу:

$C^P = 41,8\%$, $H^P = 3\%$, $S_{\text{л}}^P = 1,2\%$, $N^P = 1\%$, $O^P = 11,1\%$, $A^P = 24,9\%$. Визначити в кДж/кг і в % втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків, якщо $a_{\text{шл}} = 0,8\%$, теплоємність шлаку $c_{\text{шл}} = 0,934 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ і температура шлаку $t_{\text{шл}} = 600^\circ\text{C}$.

$$C^P = 41,8\%$$

$$H^P = 3\%$$

$$S_{\text{л}}^P = 1,2\%$$

$$N^P = 1\%$$

$$O^P = 11,1\%$$

$$A^P = 24,9\%$$

$$a_{\text{шл}} = 0,8\%$$

$$c_{\text{шл}} = 0,934 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$t_{\text{шл}} = 600^\circ\text{C}$$

$$Q_6 - ? \quad q_6 - ?$$

1. Нижча теплота згоряння палива дорівнює:

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 338C^P + 1025H^P - 108,5(O^P - S^P) - 25W^P = \\ &= 338 \cdot 41,8 + 1025 \cdot 3 - 108,5(11,1 - 1,2) - 25 \cdot 17 = \\ &= 15704,25 \text{ кДж} / \text{кг} \end{aligned}$$

2. Втрати теплоти з фізичною теплотою шлаків:

$$Q_6 = a_{\text{шл}} \cdot c_{\text{шл}} \cdot t_{\text{шл}} \cdot \frac{A^P}{100} = 0,8 \cdot 0,934 \cdot 600 \cdot \frac{24,9}{100} = 111,63 \text{ кДж} / \text{кг},$$

$$q_6 = \frac{Q_6}{Q_H^P} \cdot 100 = \frac{111,63}{15704,25} \cdot 100 = 0,7\%.$$

Задача 1.18 В топці котла з паропроодуктивністю $D = 7,22$ кг/с спалюється високо сірчистий мазут складу: $C^P = 83,4\%$, $H^P = 10\%$, $S_{II}^P = 2,9\%$, $N^P = 0,2\%$, $O^P = 0,2\%$, $A^P = 0,3\%$, $W^P = 3\%$. Визначити наявну теплоту в кДж/кг і теплоту корисно використану в котлі у %, якщо відомо: температура підігріву мазуту $t_M = 90$ °С, витрати палива $B = 0,527$ кг/с, тиск перегрітої пари $p_{II,II} = 1,3$ МПа, температура живильної води $t_{ЖВ} = 100$ °С і значення безперервної продувки $\beta = 4\%$.

$D = 7,22$ кг/с	1. Нижча теплота згоряння палива дорівнює:
$C^P = 83,4\%$	$Q_H^P = 338C^P + 1025H^P - 108,5(O^P - S^P) - 25W^P =$
$H^P = 10\%$	$= 338 \cdot 83,4 + 1025 \cdot 10 - 108,5(0,2 - 2,9) - 25 \cdot 3 = 38657,15 \text{ кДж / кг.}$
$S_{II}^P = 2,9\%$	2. Фізична теплота палива:
$N^P = 0,2\%$	$Q_{\Phi,II,II} = c_{PM} \cdot t_M = (1,74 + 0,0025 \cdot 90) \cdot 90 = 176,85 \text{ кДж / кг.}$
$O^P = 0,2\%$	3. Наявна теплота палива:
$A^P = 0,3\%$	$Q_P^P = Q_H^P + Q_{\Phi,II,II} = 38657,15 + 176,85 = 38834 \text{ кДж / кг.}$
$W^P = 3\%$	4. Теплота, яка корисно використана в котлі:
$t_M = 90$ °С	$q_1 = \eta_{KA}^{BP} = \frac{D \left[(h_{III} - h_{ЖВ}) + \frac{\beta}{100} (h_{KB} - h_{ЖВ}) \right]}{Q_P^P \cdot B} \cdot 100,$
$B = 0,527$ кг/с	$q_1 = \eta_{KA}^{BP} = \frac{7,22 \left[(2930 - 419) + \frac{4}{100} (814,5 - 419) \right]}{38834 \cdot 0,527} \cdot 100 = 89\%.$
$p_{II,II} = 1,3$ МПа	
$t_{ЖВ} = 100$ °С	
$\beta = 4\%$	
$Q_P^P - ? \quad q_1 - ?$	

Задача 1.19 В топці водогрійного котла спалюється газ з $Q_H^P = 33976$ кДж / м³. Визначити витрати натурального і умовного палива, якщо ККД брутто $\eta_{KA}^{BP} = 84\%$, витрата води $G_B = 75$ кг/с, температура води, яка поступає в котел $t_1 = 70$ °С і температура води на виході з нього $t_2 = 150$ °С.

$$Q_H^P = 33976 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

$$\eta_{KA}^{BP} = 84 \%$$

$$G_B = 75 \text{ кг/с}$$

$$t_1 = 70 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$B - ? \quad B_{YM} - ?$$

1. Корисну теплоту знаходять з рівнянь:

$$Q_1 \cdot B = G_B (h_2 - h_1),$$

$$\eta_{KA}^{BP} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_P^P} = \frac{Q_1}{Q_H^P} \quad (\text{за умови } Q_P^P = Q_H^P),$$

$$Q_1 = \eta_{KA}^{BP} \cdot Q_H^P,$$

$$Q_1 = 84 \cdot 33976 = 28539,8 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

2. Витрати натурального і умовного палив дорівнюють:

$$B = \frac{G_B (h_2 - h_1)}{Q_1} = \frac{G_B (c_p t_2 - c_p t_1)}{Q_1} = \frac{75(4,19 \cdot 150 - 4,19 \cdot 70)}{28539,8} = \frac{75(632 - 293)}{28539,8} = 0,089 \text{ кг} / \text{с};$$

$$B_{YM} = \frac{B Q_H^P}{29300} = \frac{33976 \cdot 0,089}{29300} = 1,032 \text{ кг} / \text{с}.$$

2 ПАРОТУРБІННІ УСТАНОВКИ

Парові турбіни - це двигуни, в яких потенціальна енергія пари перетворюється в кінетичну, а далі в механічну енергію обертання валу.

Цикл Ренкіна

Перетворення енергії органічного палива в механічну за допомогою водяної пари здійснюється в паросилових установках, а її теоретичний цикл називають циклом Ренкіна (рис. 2.1).

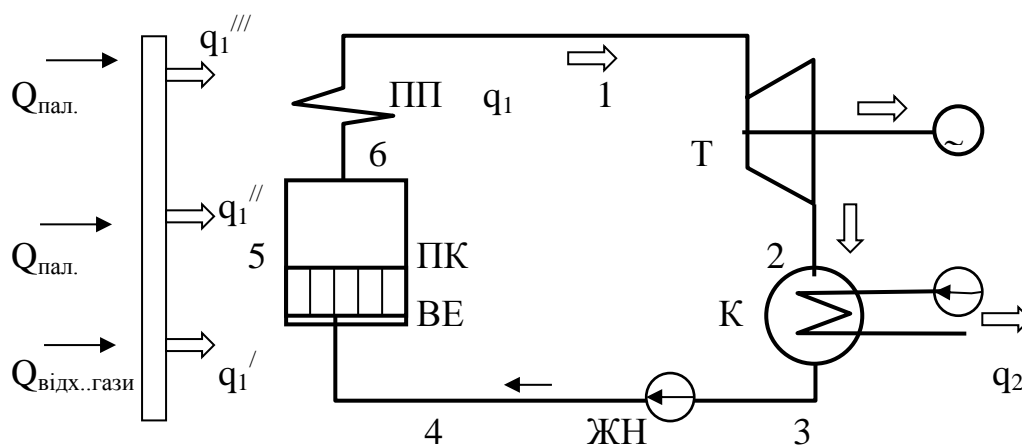


Рисунок 2.1 Принципова схема паротурбінної установки, яка працює за циклом Ренкіна

повторюється. Такий цикл називається *конденсаційним циклом Ренкіна*.

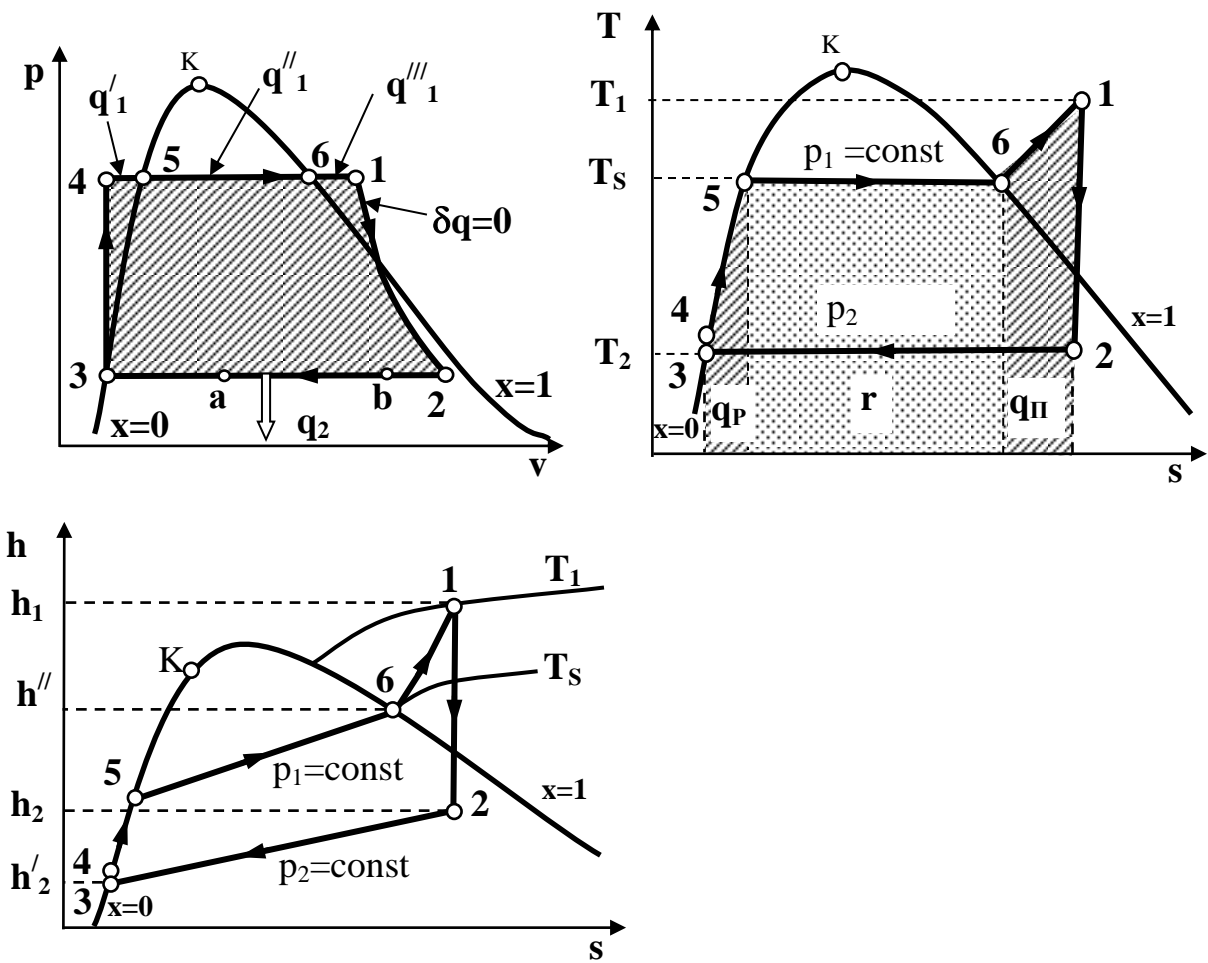


Рисунок 2.2 Цикл Ренкіна в p-v, T-s та h-s діаграмах.

Питома теплота, що підводиться до робочого тіла на ділянці 4-5-6-1 циклу при $p_1 = \text{const}$ дорівнює:

$$q_1 = h_1 - h'_2,$$

де h_1 – питома ентальпія пари, що надходить у турбіну;

h'_2 – питома ентальпія рідини, що надходить у котел.

Питома теплота, що віддається парою у конденсаторі охолоджуваній воді при постійному тиску p_2 на ділянці 2-3 циклу, обчислюється аналогічно:

$$q_2 = h_2 - h'_2,$$

де h_2 – питома ентальпія пари, що виходить з турбіни.

Термічний к.к.д. циклу Ренкіна:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h'_2) - (h_2 - h'_2)}{h_1 - h'_2} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}.$$

Цикл з проміжним перегрівом пари

Щоб уникнути підвищення вологості пари в кінцевому її стані понад допустиме значення застосовують *вторинний або проміжний перегрів пари* (рис. 2.3). Суть його полягає в тому, що пара після розширення в перших ступенях турбіни в циліндрі високого тиску (ЦВТ) до тиску $p_{\text{ппп}}$ (процес $1 - 2^*$) піддається вторинному перегріву при постійному тиску $p_{\text{ппп}}$ в проміжному пароперегрівачі до температури $T_{1'}$ (процес $2^* - 1'$); потім пара поступає в ступені циліндра низького тиску (ЦНТ), де відбувається її розширення (процес $1' - 2'$) до тиску в конденсаторі p_2 .

Питома теплота, яка підводиться до робочого тіла:

$$q_{\text{ппп}} = q_1 + q_{\text{ппп}} = (h_1 - h'_2) + (h_{1'} - h_{2*}).$$

Питома теплота, що віддається парою у конденсаторі охолоджуваній воді при постійному тиску p_2 на ділянці 2-3 циклу:

$$q_2 = (h_{2'} - h'_{2'}),$$

Питома робота циклу з проміжним перегрівом пари:

$$l = (h_1 - h_{2*}) + (h_{1'} - h_{2'}).$$

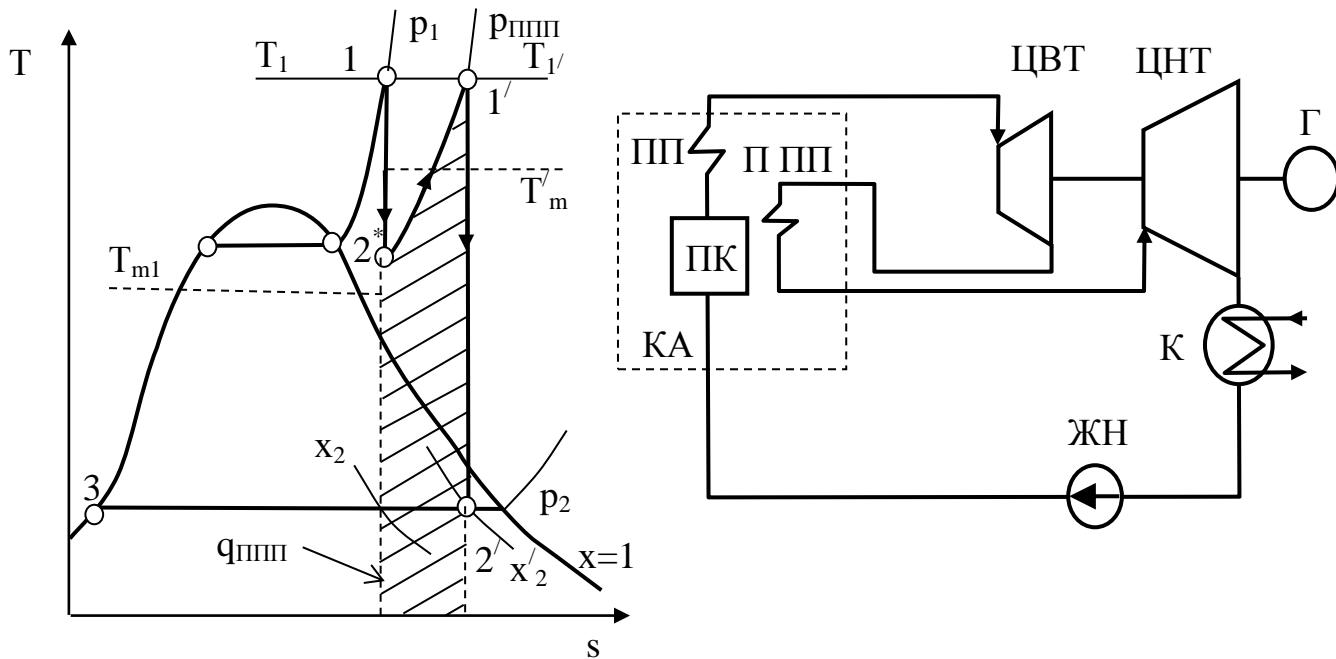


Рисунок 2.3 Схема та цикл ПТУ с проміжним перегрівом пари

Термічний ККД циклу з одним проміжним перегрівом:

$$\eta_t^{\text{ппп}} = \frac{l}{q_{1\text{ппп}}} = \frac{(h_1 - h_{2^*}) + (h_{1'} - h_{2'})}{(h_1 - h_{2'}) + (h_{1'} - h_{2^*})}.$$

Цикл ПТУ з регенеративним підігрівом живильної води

Регенеративним підігрівом живильної води (РПЖВ) називається процес підігріву живильної води парою, яка частково відпрацювала в турбіні і виконала в ній роботу (рис. 2.4).

Пара (1 кг), отримана в КА, прямує в турбіну, де відбувається її розширення до тиску в конденсаторі. Однак не вся пара, яка прийшла до турбіни, надходить до конденсатора. З кожного 1 кг пари, яка поступає в ПТ, після часткового здійснення роботи, відбирається частка пари:

$\alpha_i = \frac{D_i}{D}$ – коефіцієнт або частка відбору пари;

α_1 – у перший підігрівач П1 з ентальпією h_{01} ;

α_2 – у другий підігрівач П2 з h_{02} ;

α_3 – у третій підігрівач П3 з h_{03} .

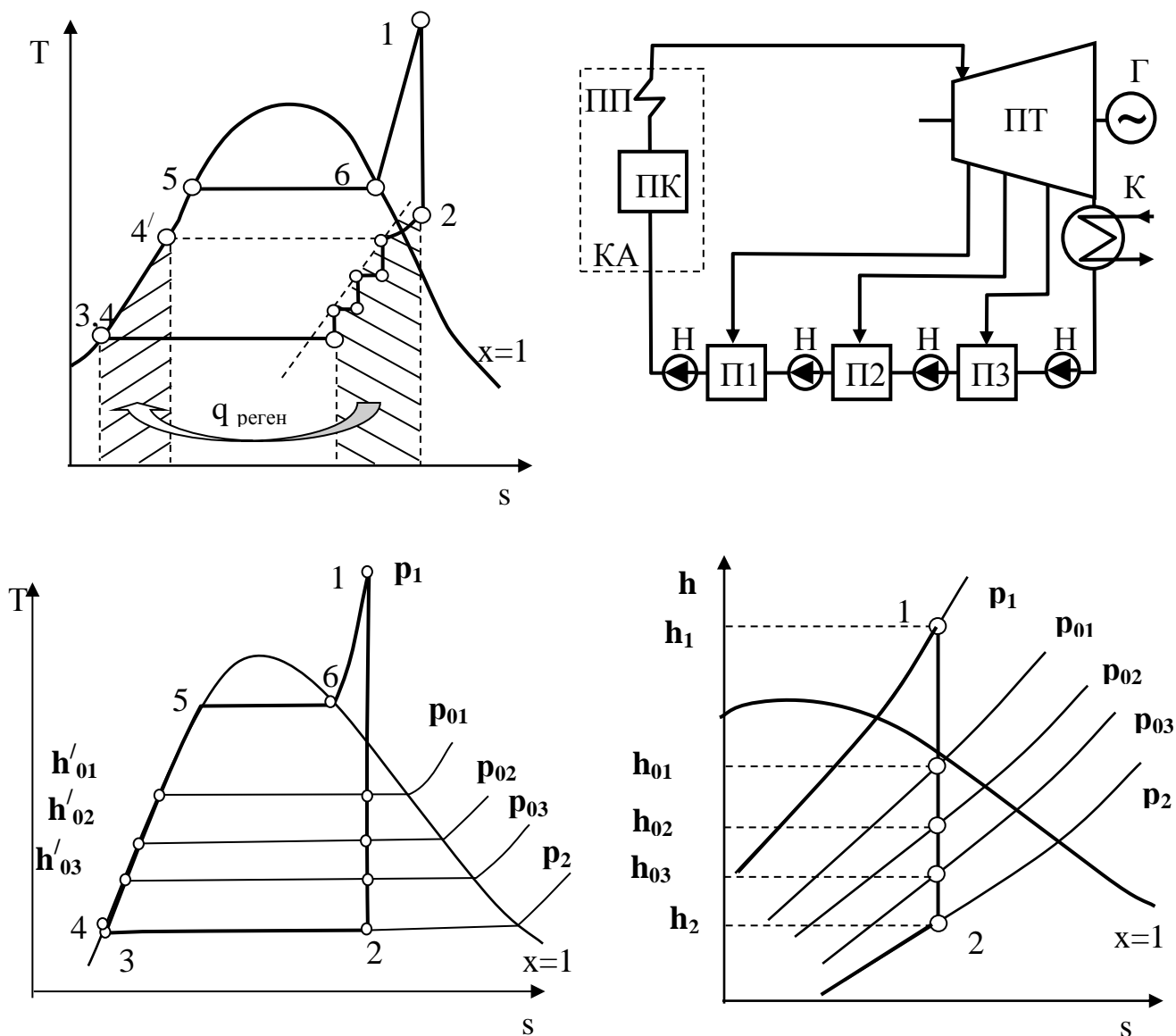


Рисунок 2.4 Схема та цикл ПТУ з регенеративним підігрівом живильної води

За рахунок конденсації водяної пари відбувається підігрів живильної води до температури більш високої, ніж t_2 .

Питома робота турбіни визначається за залежністю:

$$l_T = h_1 - h_{01} + (1 - \alpha_1)(h_{01} - h_{02}) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_{02} - h_{03}) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2 - \alpha_3)(h_{03} - h_2) = h_1 - h_2 - \alpha_1(h_{01} - h_2) - \alpha_2(h_{02} - h_2) - \alpha_3(h_{03} - h_2).$$

Оскільки робота насосів в даних розрахунках не враховується, то робота регенеративного циклу ПТУ дорівнює роботі турбіни:

$$l = l_T.$$

Термічний ККД оборотного регенеративного циклу ПТУ визначається:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2) - \alpha_1(h_{01} - h_2) - \alpha_2(h_{02} - h_2) - \alpha_3(h_{03} - h_2)}{h_1 - h'_{01}}.$$

Енергетичні баланси паротурбінних установок

Енергетичний баланс парогенератора:

$$B \cdot Q_H^P \cdot \eta_{KA} = D \cdot q_1.$$

Енергетичний баланс турбіни (теплового двигуна):

$$D \cdot l \cdot \eta_{O.EL} = N_{EL},$$

де N_{EL} – електрична потужність турбіни;

$\eta_{O.EL} = \eta_{oi} \eta_M \eta_G$ – відносний внутрішній ККД турбіни;

η_M – механічний ККД;

η_G – ККД електрогенератора.

Об'єднаний енергетичний баланс установки:

$$B \cdot Q_H^P \cdot \eta_{УСТ} = N_{EL},$$

де $\eta_{УСТ} = \eta_{KA} \cdot \eta_{O.EL} \cdot \eta_t$ – ККД ПТУ.

На базі енергетичних балансів ПТУ знаходять наступні питомі характеристики:

а) питома витрата пари:

$$d = \frac{D}{N_{EL}} = \frac{1}{l \cdot \eta_{O.EL}} = \frac{1}{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{O.EL}} \left[\frac{\text{кг пари}}{\text{кДж}} \right];$$

$$d = \frac{3600}{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{O.EL}} \left[\frac{\text{кг пари}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \right];$$

б) питома витрата палива:

$$b = \frac{B}{N_{EL}} = \frac{1}{Q_H^P \cdot \eta_{УСТ}} \left[\frac{\text{кг палива}}{\text{кДж}} \right]; b = \frac{3600}{Q_H^P \cdot \eta_{УСТ}} \left[\frac{\text{кг палива}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \right];$$

в) питома витрата теплоти:

$$q_e = \frac{B Q_H^P}{N_{EL}} = \frac{1}{\eta_{УСТ}} \cdot [\text{Дж/Дж}] \text{ або } [\text{кВт/кВт}].$$

Задача 2.1 Розрахувати характеристики ідеальної ПСУ з початковими параметрами пари $p_1=3,4$ МПа і $t_1=435^\circ\text{C}$, якщо витрата пари $D=15$ кг/с, а тиск у конденсаторі $p_2=4,9\cdot 10^3$ МПа. Прийняти $Q_H^P=21$ МДж/кг, $\eta_{KA}=0,93$, $\eta_{O.EЛ}=0,84$.

$p_1=3,4$ МПа	1. За h-s діаграмою і таблицями знаходимо:
$t_1=435^\circ\text{C}$	$h_1=3310$ кДж/кг, $h_1=f(p_1, t_1)$ за h-s діаграмою
$D=15$ кг/с	$h_2=2120$ кДж/кг, $h_2=f(p_2, s_1=s_2)$, $s_1=s_2=6,96$ кДж/кг · К
$p_2=4,9\cdot 10^3$ МПа	$t_2=32^\circ\text{C}$, $t_2=f(p_2)$ (додаток 4 за тиском p_2)
$Q_H^P=21$ МДж/кг	$h_2'=137$ кДж/кг (додаток 4 за тиском p_2).
$\eta_{KA}=0,93$	2. Питома кількість підведеної теплоти:
$\eta_{O.EЛ}=0,84$	$q_1 = h_1 - h_2' = 3310 - 137 = 3173$ кДж/кг.
$q_1=?$ $q_2=?$ $l=?$ $\eta_t=?$	3. Питома кількість відведеної теплоти:
$N_{EЛ}=?$ В-?	$q_2 = h_2 - h_2' = 2120 - 137 = 1983$ кДж/кг.
$\eta_{ПСУ}=?$	

4. Питома теоретична робота пари в турбіні:

$$4. \quad l = h_1 - h_2 = 3310 - 2120 = 1190 \text{ кДж/кг}.$$

5. Термічний к.к.д. циклу дорівнює:

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = \frac{3310 - 2120}{3310 - 137} = 0,375.$$

6. Електрична потужність турбіни:

$$N_{EЛ} = D \cdot l \cdot \eta_{O.EЛ} = 15 \cdot 1190 \cdot 0,84 = 14,99 \text{ МВт}.$$

7. Витрата палива дорівнює:

$$B Q_H^P \cdot \eta_{KA} = D \cdot q_1 \Rightarrow B = \frac{D \cdot q_1}{Q_H^P \cdot \eta_{KA}} = \frac{15 \cdot 3173}{21 \cdot 10^3 \cdot 0,93} = 2,26 \text{ кг/с}.$$

8. Визначаємо ККД ПСУ:

$$\eta_{ПСУ} = \eta_t \cdot \eta_{KA} \cdot \eta_{O.EЛ} = 0,375 \cdot 0,93 \cdot 0,84 = 0,292.$$

Задача 2.2 Розрахувати характеристики ПСУ, яка працює при початкових параметрах пари $p_1=11$ МПа і $t_1=500$ °С, $p_2=0,004$ МПа. При тиску $p_{\text{ПР}}=3$ МПа введено проміжний перегрів пари до початкової температури $t'_1 = t_1=500$ °С. Визначити термічний к.к.д. циклу з проміжним перегрівом пари. Прийняти, що витрата пари $D=20$ кг/с, $Q_H^P=25$ МДж/кг, $\eta_{KA}=0,94$, $\eta_{OEL}=0,82$.

$p_1=11$ МПа	1. За h-s діаграмою і таблицями знаходимо: $h_1=3360$ кДж/кг, $h_1=f(p_1, t_1)$ за h-s діаграмою, $h_2=2176$ кДж/кг, $h_2=f(p_2, s_1=s_2)$, $s_1=s_2=6,96$ кДж/кг · К, $h_2^*=2996$ кДж/кг, $h_2^*=f(p_{\text{ПР}}, s_1=s_{\text{ПР}})$, $h_2'=121,4$ кДж/кг (таблиця 2 за тиском p_2). $h_1'=3456$ кДж/кг, $h_1'=f(p_{\text{ПР}}, t'_1)$ за h-s діаграмою, $t_2=28$ °С, $t_2=f(p_2)$ (додаток 4 за тиском p_2), $s_1'=7,23$ кДж/кг · К, $s_2'=0,42$ кДж/кг · К.
$t_1=500$ °С	
$p_2=0,004$ МПа	
$p_{\text{ПР}}=3$ МПа	
$t'_1 = t_1=500$ °С	
$D=20$ кг/с	
$Q_H^P=25$ МДж/кг	
$\eta_{KA}=0,94$	2. Питома кількість підведеної теплоти: $q_1 = (h_1 - h_{2'}) + (h_1' - h_{2*}) = (3360 - 121,4) + (3456 - 2996) = 3698,6$ кДж / кг.
$\eta_{OEL}=0,82$	
q_1 -? q_2 -? l -? η_t -?	
$N_{\text{ЕЛ}}$ -? B -? d -? b -?	
$\eta_{\text{ПСУ}}$ -?	3. Питома кількість відведеної теплоти: $q_2 = (h_2 - h_{2'}) = 2176 - 121,4 = 2054,6$ кДж / кг .

3. Питома кількість відведеної теплоти:

$$q_2 = (h_2 - h_{2'}) = 2176 - 121,4 = 2054,6 \text{ кДж / кг .}$$

4. Питома робота пари в турбіні:

$$l = (h_1 - h_{2*}) + (h_1' - h_2) = (3360 - 2996) + (3456 - 2176) = 1644 \text{ кДж / кг .}$$

5. Термічний к.к.д. циклу дорівнює:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{1644}{3698,6} = 0,445.$$

6. Електрична потужність турбіни:

$$N_{\text{ЕЛ}} = D \cdot l \cdot \eta_{\text{OEL}} = 20 \cdot 1644 \cdot 0,82 = 26,961 \text{ МВт .}$$

7. Витрата палива дорівнює:

$$B Q_H^P \cdot \eta_{KA} = D \cdot q_1 \Rightarrow B = \frac{D \cdot q_1}{Q_H^P \cdot \eta_{KA}} = \frac{20 \cdot 3698,6}{25 \cdot 10^3 \cdot 0,94} = 3,148 \text{ кг / с .}$$

8. Питома витрата пари:

$$d = \frac{3600}{l \cdot \eta_{OEL}} = \frac{3600}{1644 \cdot 0,82} = 2,67 \left(\frac{\text{кг пари}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \right).$$

9. Визначаємо ККД ПСУ:

$$\eta_{ПСУ} = \eta_t \cdot \eta_{КА} \cdot \eta_{OEL} = 0,445 \cdot 0,94 \cdot 0,82 = 0,343.$$

10. Питома витрата палива:

$$b = \frac{3600}{Q_H^P \cdot \eta_{VCT}} = \frac{3600}{25 \cdot 10^3 \cdot 0,343} = 0,42 \left(\frac{\text{кг палива}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \right).$$

Задача 2.3 Турбіна потужністю $N = 6000$ кВт працює при параметрах пари $p_1 = 3,5$ МПа і $t_1 = 435^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,004$ МПа. Для підігріву живильної води з турбіни відбирається пара при $p = 0,12$ МПа. Визначити термічний к.к.д. регенеративного циклу η_t .

$p_1 = 3,5$ МПа

$t_1 = 435^\circ\text{C}$

$p_2 = 0,004$ МПа

$p = 0,12$ МПа

$N = 6000$ кВт

$\eta_t - ?$

1. За h - s діаграмою і таблицями знаходимо:

$h_1 = 3302$ кДж/кг, $h_1 = f(p_1, t_1)$ за h - s діаграмою,

$h_{ВД} = 2538$ кДж/кг $h'_{ВД} = 439,4$ кДж/кг,

$h_2 = 2092$ кДж/кг, $h'_2 = 121,4$ кДж/кг,

$t_2 = 29^\circ\text{C}$, $t_2 = f(p_2)$, $t_{ВД} = 104,8^\circ\text{C}$.

2. Визначаємо частку відбору α_1 вважаючи, що конденсат підігрівається у підігрівачі до $t_{ВД} = 104,8^\circ\text{C}$.

3. Запишемо рівняння теплового балансу для підігрівача:

$$\alpha_1 \cdot h_{ВД1} + (1 - \alpha_1) h'_2 = h'_{ВД1}$$

$$\alpha_1 \cdot h_{ВД1} + h'_2 - \alpha_1 h'_2 = h'_{ВД1} \Rightarrow$$

$$\alpha_1 = \frac{h'_{ВД1} - h'_2}{h_{ВД1} - h'_2} = \frac{439,4 - 121,4}{2538 - 121,4} = 0,13.$$

4. Питома робота пари в турбіні:

$$l = h_1 - h_2 - \alpha_1 (h_{ВД1} - h_2) = 3302 - 2092 - 0,13(2538 - 2092) = 1152 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

5. Питома кількість підведеної теплоти:

$$q_1 = (h_1 - h_{ВД1'}) = 3302 - 439,2 = 2862,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

6. Питома кількість відведеної теплоти:

$$q_2 = (h_2 - h_{2'}) = 2092 - 121,4 = 1970,6 \text{ кДж / кг}.$$

7. Термічний к.к.д. регенеративного циклу:

$$\eta_t = \frac{l}{h_1 - h_{ВД1}} = \frac{1152}{3302 - 439,4} = 0,4.$$

3 КОМПРЕСОРИ

Компресори призначені для стиснення і переміщення різних газів. Вони поділяються на поршневі, ротаційні, відцентрові і осьові.

Поршневі компресори. Робочий процес одноступеневого поршневого компресора зображується у вигляді індикаторної діаграми, побудованої в $p-v$ координатах та термодинамічних $p-v$ та $T-s$ діаграмах (рис. 3.1).

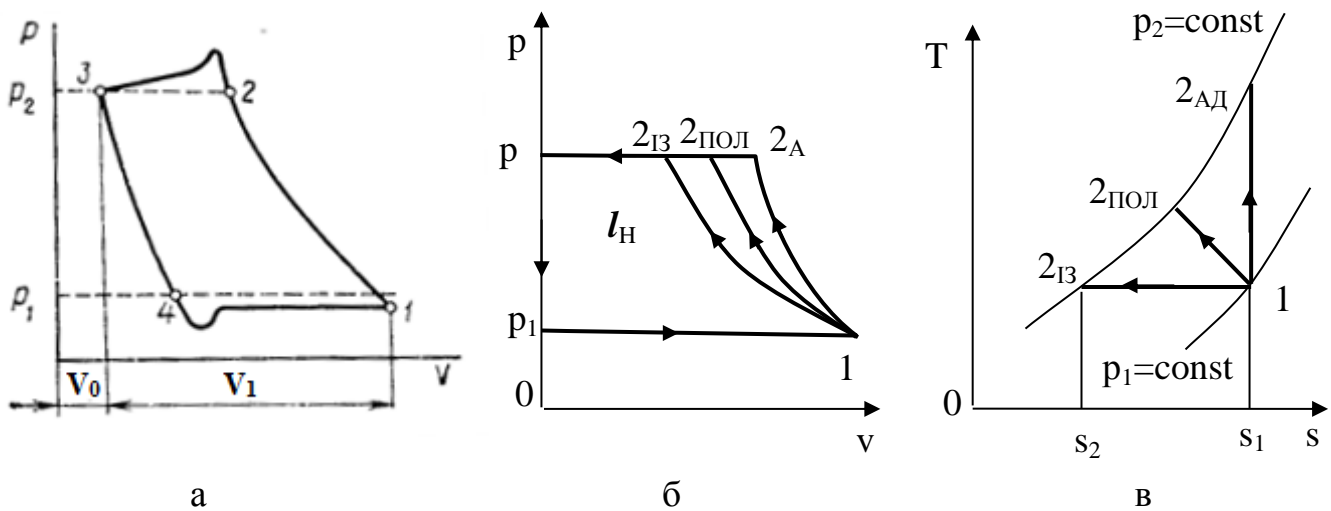


Рисунок 3.1 Процеси стиснення газу: а - індикаторна діаграма; б - $p-v$ діаграма; в - $T-s$ діаграма.

Під ступенем підвищення тиску розуміють відношення тиску на виході з ступені p_2 до тиску на вході в ступень p_1 :

$$\lambda = \frac{p_2}{p_1}.$$

Теоретична потужність приводу компресора при ізотермічному стисненні знаходиться за формулою (Вт):

$$N_{I3} = p_1 \cdot V \cdot \ln \frac{p_2}{p_1},$$

де V - об'ємна продуктивність компресора, $\text{м}^3/\text{с}$.

Теоретична потужність приводу компресора при адіабатному стисненні знаходиться за формулою (Вт):

$$N_{AD} = \frac{k}{k-1} p_1 \cdot V \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right],$$

де k – показник адіабати.

Теоретична потужність приводу компресора при політропному стисненні визначається за формулою:

$$N_{POL} = \frac{n}{n-1} p_1 \cdot V \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right],$$

де n – показник політропи, для частково охолоджуваних компресорів $1 < n < k$.

Ефективна потужність приводу компресора з охолодженням розраховується за формулою:

$$N_e = \frac{N_{IЗ}}{\eta_{eIЗ}},$$

де $\eta_{eIЗ}$ - ізотермічний ефективний к.к.д. компресора

Ефективна потужність приводу компресора без охолодження знаходиться за формулою:

$$N_e = \frac{N_{AD}}{\eta_{eAD}},$$

де η_{eAD} - адіабатний ефективний к.к.д. компресора.

Індикаторна або (внутрішня) потужність поршневого компресора (кВт) може бути знайдена за формулою:

$$N_i = \frac{p_i \cdot V_h \cdot n}{10^3},$$

де p_i – середній індикаторний тиск, Па; V_h – робочий об'єм циліндра, м³; n - частота обертання валу в секунду.

Ефективна потужність компресора:

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_M}.$$

де η_M - механічний к.к.д. компресора.

Задача 3.1 Одноступеневий поршневий компресор всмоктує повітря при тиску $p_1=1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ і температурі $t_1=17^\circ\text{C}$, стискає його до тиску $p_2=7 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Визначити теоретичну потужність приводу компресора при ізотермічному, адіабатному і політропному стисненні, якщо показник політропи $n=1,2$, а масова продуктивність компресора $M=0,12 \text{ кг/с}$.

$p_1=1 \cdot 10^5 \text{ Па}$	Теоретичні рівняння: $pV=MRT$; $N=M \cdot l$.
$t_1=17^\circ\text{C}$	
$p_2=7 \cdot 10^5 \text{ Па}$	Теоретична потужність приводу компресора при ізотермічному стисненні дорівнює:
$M=0,12 \text{ кг/с}$	
$n=1,2$	$N_{\text{із}} = M \cdot l_{\text{із}} = MRT_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = 0,12 \cdot 0,287 \cdot 290 \cdot \ln \frac{7}{1} = 19,43 \text{ кВт.}$ <p>2. Теоретична потужність приводу компресора при адіабатному стисненні дорівнює:</p> $N_{\text{ад}} = M \cdot l_{\text{ад}} = M \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] =$ $= 0,12 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 290 \left[\left(\frac{7}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 25,97 \text{ кВт}$
$N_{\text{із}}=? N_{\text{ад}}=?$	
$N_{\text{пол}}=?$	

3. Теоретична потужність приводу компресора при політропному стисненні дорівнює:

$$N_{\text{пол}} = M \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] =$$

$$= 0,12 \frac{1,2}{1,2-1} \cdot 0,287 \cdot 290 \left[\left(\frac{7}{1} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = 22,97 \text{ кВт.}$$

Задачу можна розв'язати інакше, якщо визначити об'ємну продуктивність компресора, а саме:

$$p_1 V = MRT_1 \Rightarrow V = \frac{MRT_1}{p_1} = 0,12 \frac{8314 \cdot 290}{291 \cdot 1 \cdot 10^5} = 0,1 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Тоді:

$$N_{\text{із}} = p_1 \cdot V \cdot \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad N_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} p_1 \cdot V \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right].$$

$$N_{\text{пол}} = \frac{n}{n-1} p_1 \cdot V \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right].$$

Задача 3.2 Ідеальний одноступеневий компресор з об'ємною продуктивністю за нормальних умов 500 м³/год, стискає повітря по адіабаті від $p_1=0,098$ МПа і температури $t_1=20^\circ\text{C}$ до $p_2=0,6$ МПа. Визначити температуру в кінці стиснення і теоретичну потужність для приводу компресора.

$V^{\text{н.у.}}=500 \text{ м}^3/\text{год}$	<p>I – спосіб розв'язку задачі.</p> <p>1. Масова продуктивність компресора:</p> $M = \frac{p^{\text{н.у.}} \cdot V^{\text{н.у.}}}{RT^{\text{н.у.}}} = \frac{101,3 \cdot 0,139}{0,287 \cdot 273} = 0,1797 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$ <p>2. Теоретична потужність приводу компресора при адіабатному стисненні дорівнює:</p>
$p_1=0,098 \text{ МПа}$	
$t_1=20^\circ\text{C}$	
$p_2=0,6 \text{ МПа}$	
$T_2=? \quad N_{\text{ад}}=?$	

$$N_{\text{ад}} = M \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] =$$

$$= 0,1797 \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 293 \left[\left(\frac{0,6}{0,098} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 35,8 \text{ кВт}.$$

3. Визначимо температуру в кінці стиснення:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \left(\frac{0,6}{0,098} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 491,6 \text{ К}.$$

II спосіб розв'язку задачі.

1. Приводимо об'ємну продуктивність компресора до умов всмоктування. Для цього записуємо рівняння стану для умов всмоктування і для нормальних умов:

$$p^{H.Y.} V^{H.Y.} = MRT^{H.Y.}, \quad p_1 V = MRT_1.$$

Тоді

$$V = \frac{p^{H.Y.} V^{H.Y.} \cdot T_1}{p_1 \cdot T^{H.Y.}} = \frac{101,3 \cdot 0,139 \cdot 293}{98 \cdot 273} = 0,1542 \frac{m^3}{c}.$$

2. Теоретична потужність приводу компресора при адіабатному стисненні дорівнює:

$$N_{Ad} = \frac{k}{k-1} p_1 \cdot V \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = 0,1542 \cdot \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 98 \left[\left(\frac{0,6}{0,098} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 35,8 \text{ кВт}.$$

Задача 3.3 Одноступеневий компресор з масовою витратою 175 кг/год адіабатно стискає повітря від $p_1=0,1$ МПа до $p_2=0,65$ МПа. Визначити дійсну температуру повітря в кінці стиснення і ефективну потужність приводу компресора, якщо внутрішній відносний к.к.д. компресора $\eta_{oi}^K=0,8$, механічний - $\eta_M=0,85$, температура повітря, яке всмоктується $t_1=30^\circ\text{C}$, показник адіабати повітря $k=1,4$.

$M=175$ кг/год

$p_1=0,1$ МПа

$p_2=0,65$ МПа

$\eta_{oi}^K=0,8$

$\eta_M=0,85$

$t_1=30^\circ\text{C}$

$k=1,4$

1. Теоретична температура в кінці адіабатного стиснення:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 303 \left(\frac{0,65}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 517 \text{ K}.$$

2. Дійсна температура повітря на виході з компресора:

$$\eta_{oi}^K = \frac{l_T^K}{l_o^K} = \frac{h_2 - h_1}{h_2^o - h_1} = \frac{T_2 - T_1}{T_2^o - T_1} \Rightarrow T_2^o = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{\eta_{oi}^K} = 303 + \frac{517 - 303}{0,8} = 570,5 \text{ K}.$$

$N_e - ? \quad t_2^o - ?$

3. Теоретична робота, яка витрачається на стиснення газу в компресорі:

$$l^K = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 303 \left[\left(\frac{0,65}{0,1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 215,2 \text{ кДж / кг}.$$

4. Ефективна потужність приводу компресора:

$$N_e = \frac{M \cdot l_K}{\eta_{oi}^K \cdot \eta_M} = \frac{175 \cdot 215,2}{0,8 \cdot 0,85 \cdot 3600} = 15,38 \text{ кВт}.$$

4 ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

Параметри, які характеризують роботу двигунів

Середній індикаторний тиск і індикаторна потужність. Під середнім індикаторним тиском p_i розуміють такий умовний сталий тиск, який діє на поршень протягом одного робочого ходу, здійснює роботу, яка дорівнює індикаторній роботі газів в циліндрі за робочий цикл.

Індикаторною потужністю N_i називають роботу, яку здійснюють гази в циліндрах двигуна в одиницю часу.

Індикаторна потужність двигуна (кВт) визначається за формулою:

$$N_i = \frac{2 \cdot p_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau},$$

де p_i – середній індикаторний тиск, Па; V_h – робочий об'єм циліндра, м³; n – частота обертання колінчастого валу в секунду; τ – тактність двигуна; i – число циліндрів.

Робочий об'єм циліндра, м³:

$$V_h = \frac{\pi D^2 \cdot S}{4},$$

де D – діаметр циліндра, м; S – хід поршня, м.

Ступінь стиснення двигуна ε дорівнює відношенню повного об'єму циліндра V_a до об'єму камери згорання V_3 , тобто:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_3} = \frac{V_h + V_3}{V_3} = \frac{V_h}{V_3} + 1.$$

Якщо відомі ступінь стиснення ε і об'єм камери згорання V_3 , то робочий об'єм циліндра V_h м³, може бути розрахований за формулою:

$$V_h = (\varepsilon - 1)V_3.$$

Ефективна потужність двигуна і середній ефективний тиск

Ефективною потужністю N_E називається потужність, яка знімається з колінчастого валу двигуна для отримання корисної роботи.

Ефективна потужність менше індикаторної потужності N_i на величину потужності механічних втрат N_M , тобто:

$$N_E = N_i - N_M.$$

Механічні втрати в двигуні оцінюються механічним к.к.д. η_M , який являє собою відношення ефективної потужності до індикаторної:

$$\eta_M = \frac{N_E}{N_i} = \frac{N_i - N_M}{N_i} = 1 - \frac{N_M}{N_i}.$$

Для сучасних двигунів η_M складає 0,72-0,9. Якщо відомий механічний к.к.д., то можна визначити ефективну потужність.

$$N_E = N_i \cdot \eta_M.$$

Ефективна потужність двигуна N_E може бути розрахована через середній ефективний тиск:

$$N_E = \frac{2 \cdot p_E \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau}.$$

Середній ефективний тиск p_E дорівнює різниці між середнім індикаторним тиском p_i і середнім тиском p_M механічних втрат:

$$p_E = p_i - p_M.$$

Якщо відомий механічний к.к.д. , то можна визначити середній ефективний тиск, Па:

$$p_E = p_i \cdot \eta_M.$$

Індикаторний к.к.д. і питома індикаторна витрата палива

Економічність дійсного робочого циклу двигуна оцінюється індикаторним к.к.д η_i та питомою індикаторною витратою палива b_i .

Індикаторний к.к.д η_i оцінює ступінь використання теплоти в дійсному циклі з урахуванням всіх теплових втрат і являє собою відношення теплоти, еквівалентної корисній індикаторній роботі, до всієї підведеної теплоти:

$$\eta_i = \frac{N_i}{B \cdot Q_H^P},$$

де N_i – індикаторна потужність, кВт.

Питома індикаторна витрата палива b_i (кг/кВт·год) являє собою відношення витрати палива B до індикаторної потужності N_i :

$$b_i = \frac{3600 \cdot B}{N_i}.$$

Ефективний к.к.д. і питома ефективна витрата палива

Економічність роботи двигуна в цілому оцінюється ефективним к.к.д η_E і питомою ефективною витратою палива b_E .

Ефективний к.к.д η_E оцінює ступінь використання теплоти палива з урахуванням всіх видів втрат (як теплових, так і механічних) і являє собою відношення теплоти, еквівалентної корисній ефективній роботі, до всієї витраченої теплоти:

$$\eta_E = \frac{N_E}{B \cdot Q_H^p}.$$

Якщо відомі індикаторний і механічний к.к.д., тоді:

$$\eta_E = \eta_i \cdot \eta_M.$$

Питома ефективна витрата палива b_E (кг/кВт·год) являє собою відношення витрати палива B до ефективної потужності N_E :

$$b_E = \frac{3600 \cdot B}{N_E}.$$

Маса повітря, яка проходить через двигун (кг/с):

$$M_{\text{пов}} = \frac{2 \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot n \cdot i \cdot \rho_{\text{пов}}}{\tau},$$

де V_h - робочий об'єм циліндра, м³; η_v - коефіцієнт наповнення циліндрів; n - частота обертання колінчастого валу в секунду; i - число циліндрів; $\rho_{\text{пов}}$ - густина повітря, кг/м³; τ - тактність двигуна.

Задача 4.1 Визначити ефективну потужність і питому ефективну витрату палива восьмициліндрового 4-тактного дизельного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $p_i = 7,5 \cdot 10^5$ Па, ступінь стиснення $\varepsilon = 16,5$, об'єм камери згорання $V_3 = 12 \cdot 10^{-5}$ м³, кутова швидкість обертання колінчастого валу $\omega = 220$ рад/с, механічний к.к.д. $\eta_M = 0,8$ і витрата палива $B = 1,02 \cdot 10^{-2}$ кг/с.

$i = 8$	1. Середній ефективний тиск:
$\tau = 4$	$p_E = p_i \cdot \eta_M = 7,5 \cdot 10^5 \cdot 0,8 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па.}$
$p_i = 7,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$	2. Робочий об'єм циліндра:
$\varepsilon = 16,5$	$V_h = (\varepsilon - 1) V_3 = (16,5 - 1) 12 \cdot 10^{-5} = 18,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$
$V_3 = 12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	3. Частота обертання колінчастого валу за секунду:
$\omega = 220 \text{ рад/с}$	$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{220}{2 \cdot 3,14} = 35 \text{ об / с.}$
$\eta_M = 0,8$	4. Ефективна потужність двигуна:
$B = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ кг/с}$	$N_E = \frac{2 \cdot p_E \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} = \frac{2 \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot 18,6 \cdot 10^{-4} \cdot 35 \cdot 8}{10^3 \cdot 4} = 156,24 \text{ кВт.}$
$N_E - ? \quad b_E - ?$	

5. Питома ефективна витрата палива:

$$b_E = \frac{B \cdot 3600}{N_E} = \frac{1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 3600}{156,24} = 0,235 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}.$$

Задача 4.2 Визначити питому індикаторну витрату палива восьмициліндрового 4-тактного карбюраторного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $p_i = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$, діаметр циліндра $D = 0,12 \text{ м}$, хід поршня $S = 0,1 \text{ м}$, кутова швидкість обертання колінчастого валу $\omega = 377 \text{ рад/с}$, механічний к.к.д. $\eta_M = 0,8$ і витрата палива $B = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$.

$i = 8$	1. Робочий об'єм циліндра:
$\tau = 4$	$V_h = \frac{\pi D^2 \cdot S}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,12^2 \cdot 0,1}{4} = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$
$p_i = 8 \cdot 10^5 \text{ Па}$	2. Частота обертання колінчастого валу за секунду:
$D = 0,12 \text{ м}$	$n = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{377}{2 \cdot 3,14} = 60 \text{ об / с.}$
$\omega = 377 \text{ рад/с}$	3. Індикаторна потужність двигуна:
$S = 0,1 \text{ м}$	$N_i = \frac{2 \cdot p_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} = \frac{2 \cdot 8 \cdot 10^5 \cdot 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 8}{10^3 \cdot 4} = 217 \text{ кВт.}$
$\eta_M = 0,8$	
$B = 16 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$	
$N_E - ? \quad b_i - ?$	

4. Ефективна потужність двигуна:

$$N_E = N_i \cdot \eta_M = 217 \cdot 0,8 = 173,6 \text{ кВт}.$$

4. Питома індикаторна витрата палива:

$$b_i = \frac{B \cdot 3600}{N_i} = \frac{16 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{217} = 0,265 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}.$$

Задача 4.3 Визначити ефективний к.к.д. шестициліндрового 4-тактного карбюраторного двигуна, якщо середній ефективний тиск $p_E = 6,2 \cdot 10^5$ Па, теплота згорання палива $Q_H^P = 44000$ кДж/кг, діаметр циліндра $D = 0,092$ м, хід поршня $S = 0,082$ м, середня швидкість поршня $c_m = 8,2$ м/с, витрата палива $B = 4,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с.

$i = 6$	1. Робочий об'єм циліндра:
$\tau = 4$	$V_h = \frac{\pi D^2 \cdot S}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,092^2 \cdot 0,082}{4} = 5,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$
$p_E = 6,2 \cdot 10^5$ Па	2. Частота обертання колінчастого валу за секунду:
$Q_H^P = 44000$ кДж/кг	$n = \frac{c_m}{2 \cdot S} = \frac{8,2}{2 \cdot 0,082} = 50 \text{ об / с}.$
$D = 0,092$ м	3. Ефективна потужність двигуна:
$c_m = 8,2$ м/с	$N_E = \frac{2 \cdot p_E \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} = \frac{2 \cdot 6,2 \cdot 10^5 \cdot 5,45 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 6}{10^3 \cdot 4} =$
$S = 0,082$ м	$= 50,7 \text{ кВт}.$
$B = 4,4 \cdot 10^{-3}$ кг/с	
$\eta_E = ?$	

4. Ефективний к.к.д.:

$$\eta_E = \frac{N_E}{B \cdot Q_H^P} = \frac{50,7}{4,4 \cdot 10^{-3} \cdot 44000} = 0,262.$$

Задача 4.4 Визначити витрати палива шестициліндрового 4-тактного дизельного двигуна, якщо середній індикаторний тиск $p_i = 9 \cdot 10^5$ Па, повний об'єм циліндра $V_a = 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, об'єм камери згорання $V_3 = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, частота обертання колінчастого валу $n = 2220$ об/хв., теплота згорання палива $Q_H^P = 42800$ кДж/кг, ефективний к.к.д. $\eta_E = 0,35$, а механічний к.к.д. $\eta_M = 0,84$.

$i = 6$	1. Робочий об'єм циліндра:
$\tau = 4$	$V_h = V_a - V_3 = 7,9 \cdot 10^{-4} - 6,910^{-5} = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$
$p_i = 9 \cdot 10^5 \text{ Па}$	2. Індикаторний к.к.д.:
$V_a = 7,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$	$\eta_i = \frac{\eta_E}{\eta_M} = \frac{0,35}{0,84} = 0,417.$
$V_3 = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$	3. Індикаторна потужність двигуна:
$Q_H^P = 42800 \text{ кДж/кг}$	$N_i = \frac{2 \cdot p_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^5 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2220 \cdot 6}{10^3 \cdot 4 \cdot 60} = 72 \text{ кВт}.$
$n = 2220 \text{ об/хв}$	4. Витрата палива:
$\eta_E = 0,35$	$B = \frac{N_i}{\eta_i \cdot Q_H^P} = \frac{72}{0,417 \cdot 42800} = 0,004 \text{ кг/с}.$
$\eta_M = 0,84.$	
$B?$	

Задача 4.5 Визначити середню швидкість поршня і ступінь стиснення чотирициліндрового 4-тактного карбюраторного двигуна, якщо ефективна потужність $N_E = 51,5 \text{ кВт}$, середній ефективний тиск $p_E = 6,45 \cdot 10^5 \text{ Па}$, хід поршня $S = 0,092 \text{ м}$, частота обертання колінчастого валу $n = 4000 \text{ об/хв.}$ і об'єм камери згорання $V_3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$

$i = 4$	1. Середня швидкість поршня:
$\tau = 4$	$c_m = n \cdot 2S = \frac{4000}{60} \cdot 2 \cdot 0,092 = 12,26 \text{ м/с}.$
$p_E = 6,45 \cdot 10^5 \text{ Па}$	2. Робочий об'єм циліндра:
$V_3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$	$N_E = \frac{2 \cdot p_E \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} \Rightarrow V_h = \frac{N_E \cdot 10^3 \cdot \tau}{2 \cdot p_E \cdot n \cdot i} =$
$n = 4000 \text{ об/хв.}$	$= \frac{51,5 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 60}{2 \cdot 6,45 \cdot 10^5 \cdot 4000 \cdot 4} = 5,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$
$S = 0,092 \text{ м}$	3. Індикаторна потужність двигуна:
$N_E = 51,5 \text{ кВт}$	$N_i = \frac{2 \cdot p_i \cdot V_h \cdot n \cdot i}{10^3 \cdot \tau} = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^5 \cdot 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2220 \cdot 6}{10^3 \cdot 4 \cdot 60} = 72 \text{ кВт}.$
$c_m? \quad \varepsilon?$	

4. Повний об'єм циліндра:

$$V_a = V_h + V_3 = 5,99 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-4} = 6,99 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

5. Ступінь стиснення:

$$\varepsilon = \frac{V_a}{V_3} = \frac{6,99 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}} \approx 7.$$

5 ГАЗОВІ ТУРБІНИ

Характеристики робочого процесу турбінної ступені

Наявний тепло перепад в ступені (кДж/кг) визначається за формулою:

$$H_o = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_o \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

де **k** – показник адіабати; **R** – газова стала 1 кг газу Дж/кг·К; **p_o** і **T_o** - початкові параметри: тиск (Па) і абсолютна температура (К) перед ступенем турбіни; **p₂** – тиск газу після ступеня турбіни, Па.

Втрати теплоти в турбіні оцінюються відносним внутрішнім к.к.д. - η_{oi} , який являє собою відношення використаного тепло перепаду H_i до наявного тепло перепаду в турбіні H_o , тобто:

$$\eta_{oi} = \frac{H_i}{H_o}.$$

Значення відносного внутрішнього к.к.д. газових турбін знаходиться в межах 0,85-0,9. Механічні втрати оцінюються механічним к.к.д., який являє собою відношення ефективної потужності N_E до внутрішньої N_i , тобто:

$$\eta_M = \frac{N_E}{N_i}.$$

Значення механічного к.к.д. газових турбін - 0,96-0,99.

Втрати теплоти в середині турбіни і механічні втрати оцінюються відносним ефективним к.к.д турбіни, який дорівнює:

$$\eta_{oE} = \eta_{oi} \cdot \eta_M.$$

Значення η_{oE} турбін в залежності від їх потужності складає 0,8-0,9.

Потужності турбіни

Ефективною потужністю **N_E** (кВт) називають потужність, яку знімають з валу турбіни і визначають за формулою:

$$N_E = G_\Gamma \cdot H_O \cdot \eta_{OE}.$$

Внутрішня (індикаторна) потужність N_i (кВт) знаходиться за формулою:

$$N_i = \frac{N_E}{\eta_M}.$$

Секундна витрата газу на турбіну (кг/с) визначається за формулою:

$$G_\Gamma = \frac{N_E}{H_O \cdot \eta_{OE}}.$$

Питома ефективна витрата газу (кг/кВт·год) являє собою відношення секундної витрати газу G_Γ до ефективної потужності, тобто:

$$b_E = \frac{G_\Gamma}{N_E} = \frac{3600}{H_O \cdot \eta_{OE}}.$$

Задача 5.1 Турбіна працює з початковими параметрами газу $p_O = 0,32$ МПа, $t_O = 827$ °С і тиском за турбіною $p_2 = 0,15$ МПа. Визначити ефективну потужність і питому ефективну витрату газу, якщо витрата газу $G_\Gamma = 28$ кг/с, $\eta_{OE} = 0,74$, показник адіабати $k = 1,34$, а газова стала $R = 287$ Дж/кг·К.

$p_O = 0,32$ МПа	1. Найвищий теплоперепад в турбіні визначається:
$T_O = 827$ °С	$H_O = \frac{k}{k-1} \cdot R T_O \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_O} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] =$ $\frac{1,34}{1,34-1} \cdot 0,287 \cdot 1100 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,15}{0,32} \right)^{\frac{1,34}{1,34-1}} \right] = 217,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
$p_2 = 0,15$ МПа	
$G_\Gamma = 28$ кг/с	
$\eta_{OE} = 0,74$	
$k = 1,34$	2. Ефективна потужність:
$R = 284 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$N_E = G_\Gamma \cdot H_O \cdot \eta_{OE} = 28 \cdot 217,5 \cdot 0,74 = 4506,6 \text{ кВт}.$
$N_E - ? \quad b_E - ?$	

3. Питома ефективна витрата газу:

$$b_E = \frac{G_\Gamma}{N_E} = \frac{3600}{H_O \cdot \eta_{OE}} = 22,4 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}.$$

Задача 5.2 Турбіна працює з початковими параметрами газу $p_0 = 0,48$ МПа, $t_0 = 727$ °С і тиском газу за турбіною $p_2 = 0,26$ МПа. Визначити внутрішню потужність турбіни, якщо витрата газу $G_T = 26$ кг/с, відносний ефективний к.к.д. турбіни $\eta_{OE} = 0,75$, механічний к.к.д. турбіни $\eta_M = 0,98$, показник адіабати $k = 1,4$ і газова стала $R = 287$ Дж/кг К.

$p_0 = 0,48$ МПа	1. Наявний теплоперепад в турбіні визначається:
$t_0 = 727$ °С	$H_o = \frac{k}{k-1} \cdot RT_o \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] =$
$p_2 = 0,26$ МПа	$\frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 1000 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,26}{0,48} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} \right] = 161,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
$G_T = 260$ кг/с	
$\eta_{OE} = 0,75$	2. Ефективна потужність турбіни дорівнює:
$k = 1,4$	$N_E = G_T \cdot H_o \cdot \eta_{OE} = 26 \cdot 161,4 \cdot 0,75 = 3147,3 \text{ кВт.}$
$\eta_M = 0,98$	3. Внутрішня потужність турбіни:
$R = 287$ Дж/кг К	$N_i = \frac{N_E}{\eta_M} = \frac{3147,3}{0,98} = 3211 \text{ кВт.}$
$N_i - ?$	

Задача 5.3 Визначити відносний ефективний і внутрішній к.к.д. турбіни, якщо ефективна потужність турбіни $N_E = 7000$ кВт, витрата газу $G_T = 28,5$ кг/с, наявний теплоперепад в турбіні $H_0 = 295$ кДж/кг і механічний к.к.д. турбіни $\eta_M = 0,97$.

$N_E = 7000$ кВт	1. Відносний ефективний к.к.д. турбіни:
$G_T = 28,5$ кг/с	$\eta_{OE} = \frac{N_E}{G_T \cdot H_o} = \frac{7000}{28,5 \cdot 295} = 0,832.$
$H_0 = 295$ кДж/кг	2. Внутрішній к.к.д. турбіни:
$\eta_M = 0,97$	$\eta_{Oi} = \frac{\eta_{OE}}{\eta_M} = \frac{0,832}{0,97} = 0,858.$
$\eta_{OE} - ? \quad \eta_{Oi} - ?$	

Задача 5.4 Визначити термічний к.к.д. ідеального циклу ГТУ, яка працює з підведенням теплоти при $p = \text{const}$, а також $\eta_t^{\text{д}}$ дійсного циклу, тобто з урахуванням необоротності процесів розширення у турбіні і стиснення у компресорі, якщо $\eta_{oi}^T = 0,88$ і $\eta_{oi}^K = 0,85$. Відомо, що $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $\pi_k = 6$, $t_3 = 900^\circ\text{C}$. Робоче тіло повітря, $k = 1,41$.

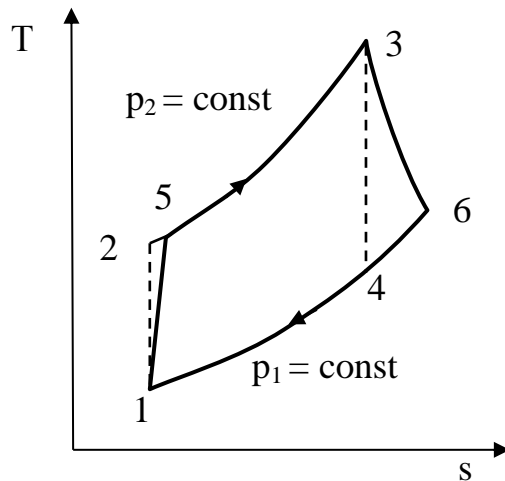


Рисунок 5.1 Теоретичний та дійсний цикл ГТУ

$p = \text{const}$

$$\eta_{oi}^T = 0,88$$

$$\eta_{oi}^K = 0,85$$

$$t_1 = 20^\circ\text{C}$$

$$\pi_k = 6$$

$$t_3 = 900^\circ\text{C}$$

$c = \text{const}$

$$k = 1,41$$

$$\eta_t - ? \quad \eta_t^{\text{д}} - ?$$

1. Визначаємо температури у точках 2 і 4:

$$T_2 = T_1 \cdot \pi_k^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 6^{\frac{1,41-1}{1,41}} = 492,6 \text{ K}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow T_4 = T_3 \cdot \frac{T_1}{T_2} \left(\begin{array}{l} \text{бо} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \\ \text{а} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_3}{p_4} \end{array} \right),$$

$$T_4 = 1173 \cdot \frac{293}{492,6} = 697,7 \text{ K}.$$

2. Термічний ККД ідеального циклу можна визначити двома способами:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi_k^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{6^{\frac{1,41-1}{1,41}}} = 0,405.$$

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{697,7 - 293}{1173 - 492,6} = 0,405.$$

3. Знайдемо температуру в точці 5 через η_{oi}^k :

$$\eta_{oi}^k = \frac{T_2 - T_1}{T_5 - T_1} \Rightarrow T_5 = \frac{T_2 - T_1}{\eta_{oi}^k} + T_1 = \frac{492,6 - 293}{0,85} + 293 = 527,8 K.$$

4. Знайдемо температуру в точці 6 через η_{oi}^T :

$$\eta_{oi}^T = \frac{T_3 - T_6}{T_3 - T_4} \Rightarrow T_6 = T_3 - \eta_{oi}^T (T_3 - T_4) = 1173 - 0,88(1173 - 697,7) = 754,7 K.$$

5. Термічний ККД дійсного циклу:

$$\eta_t^D = 1 - \frac{T_6 - T_1}{T_3 - T_5} = 1 - \frac{754,7 - 293}{1173 - 527,8} = 0,284.$$

Задача 5.5 Турбіна працює з початковими параметрами газу $p_0 = 0,48$ МПа, $t_0 = 800^\circ\text{C}$ і тиском газу за турбіною $p_2 = 0,26$ МПа. Визначити, на скільки зменшиться ефективна потужність турбіни, якщо при такій ж витраті газу $G_\Gamma = 20$ кг/с, відносний, ефективний к.к.д. турбіни зменшується з $\eta_{OE} = 0,75$ до $\eta_{OE}' = 0,73$. Робочий газ має властивості повітря.

$G_\Gamma = 20$ кг/с	1. Наявний теплоперепад в турбіні визначається:
$p_0 = 0,48$ МПа	
$t_0 = 800^\circ\text{C}$	
$p_2 = 0,26$ МПа	
$\eta_{OE} = 0,75$	
$\eta_{OE}' = 0,73$	$H_o = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_o \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_o} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] =$ $\frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,287 \cdot 1073 \left[1 - \left(\frac{0,26}{0,48} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} \right] = 173,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$
$\Delta N_E - ?$	

2. Ефективна потужність турбіни:

$$N_E = G_\Gamma \cdot H_o \cdot \eta_{OE} = 20 \cdot 173,2 \cdot 0,75 = 2598 \text{ кВт}.$$

3. Ефективна потужність турбіни при $\eta_{OE}' = 0,73$:

$$N_E' = G_\Gamma \cdot H_o \cdot \eta_{OE}' = 20 \cdot 173,2 \cdot 0,73 = 2528 \text{ кВт}.$$

4. Зміна ефективної потужності турбіни:

$$\Delta N_E = N_E - N_E' = 2598 - 2528 = 70 \text{ кВт}.$$

6 КОНДЕСАЦІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ТА ТЕПЛОЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛІ

Електростанція – це підприємство для виробництва електричної енергії шляхом перетворення енергії якого-небудь природного джерела (органічного палива, ядерного, сонячної енергії та ін.) в електроенергію.

Теплові електростанції, призначені для виробництва тільки електроенергії, називаються **конденсаційними електричними станціями** (КЕС).

Теплоелектростанції, на яких відпрацьована пара разом з виробництвом електроенергії використовується для теплопостачання (постачання пари та гарячої води тепловому споживачу), називаються **теплоелектроцентралями** (ТЕЦ).

6.1 Роздільний спосіб енерговиробництва

При роздільному способі енерговиробництва електроенергію виробляють КЕС, а теплову енергію –котельні.

Економічність роботи КЕС оцінюється наступними основними показниками: ККД установки, питомою витратою умовного палива на одиницю виробленої енергії і її собівартістю. Ці показники можуть відноситися до енергії, виробленої на КЕС за звітний період (позначається індексом *брутто*), або до енергії, відпущеної зовнішнім споживачам, тобто з урахуванням енергії, витраченої на власні потреби – *нетто*.

Повний ККД (брутто) КЕС є відношенням електричної енергії, яка вироблена станцією, до кількості витраченої теплоти:

$$\eta_{KES}^{BP} = \frac{W}{BQ_H^P},$$

де W – кількість електричної енергії, виробленої за **певний** період часу, кДж/год, кДж/доба, кДж/рік та ін.; B – витрата палива за той же період часу.

З урахуванням витрати енергії на власні потреби – $W_{ВЛП}$, повний ККД станції

нетто визначається з залежності:

$$\eta_{KEC}^{HETTO} = \frac{W - W_{BЛП}}{BQ_H^P}.$$

η_{KEC}^{BP} можна представити як добуток окремих ККД, що враховують: неминучі втрати теплоти q_2 в термодинамічному циклі η_t , внутрішні втрати на тертя і завихрення в паровій турбіні η_{oi} , механічні втрати в підшипниках η_M , електричні в генераторі η_G , втрати в парогенераторі η_{KA} і паропроводах η_{TP} :

$$\eta_{KEC}^{BP} = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_{KA} \cdot \eta_{TP}.$$

Для підвищення теплової ефективності КЕС необхідно прагнути збільшувати кожний з цих ККД

Теплову економічність КЕС виражають величиною *питомої витрати умовного палива* ($Q_{YM} = 29300$ кДж/кг) на виробництво 1 МДж електроенергії:

$$b_{KEC}^{YM} = \frac{10^3}{\eta_{KEC}^{BP} \cdot Q_{YM}} = \frac{0,0343}{\eta_{KEC}^{BP}}, \text{ кг/ МДж.}$$

Питома витрата теплоти на виробництво 1 МДж електроенергії:

$$d_{KEC} = \frac{1}{\eta_{KEC}^{BP}}, \text{ МДж/МДж.}$$

Собівартість електроенергії, що відпускається КЕС, є одним з основних показників її економічності і визначається відношенням сумарних витрат на виробництво електроенергії $\sum S_{витр}$ за певний період на кількість відпущеної за цей час електроенергії $W_{ВД}$:

$$S_E = \frac{\sum S_{ВИТР}}{W_{ВД}} 10^2 \text{ коп/ МДж.}$$

У сумарні витрати входять такі складові частини:

- 1) витрати на паливо $S_{ПАЛ}$;
- 2) витрати на утримання обслуговуючого персоналу $S_{ПЕР}$;
- 3) витрати на охолоджуючу воду і різні експлуатаційні матеріали $S_{ВОД}$;
- 4) амортизаційні відрахування $S_{АМ}$, розмір яких встановлюється директивними органами;
- 5) витрати на поточний ремонт $S_{РЕМ}$, які приймаються рівними 20-30% від

амортизаційних відрахувань;

б) інші загальностанційні витрати $S_{СТ}$.

Отже, сумарні витрати по КЕС складають:

$$S_{ВИТР} = S_{ПАЛ} + S_{ПЕР} + S_{ВОД} + S_{АМ} + S_{РЕМ} + S_{СТ}.$$

Витрати за пунктами 1 і 3 приблизно пропорційні виробництву електроенергії, їх називають **змінними витратами**. Вони складають 60-70% сумарних, причому основна їх частина - витрати на паливо.

Витрати за пунктами 2,4, 6 майже не залежать від навантаження і режимів роботи КЕС, їх називають **постійними**. Ці витрати визначаються в основному питомою вартістю встановленого устаткування.

6.2 Комбінований спосіб енерговиробництва

Комбінований спосіб енерговиробництва - це одночасне виробництво теплоти і електричної енергії (пара, яка частково відпрацювала в турбіні і виробила електричну енергію, йде на покриття теплових навантажень).

Централізоване відпущення теплоти від ТЕЦ називається **теплофікацією**.

Показники теплової економічності ТЕЦ

Теплова економічність виробництва електричної і теплової енергії визначається рядом показників:

ККД ТЕЦ брутто по виробництву електричної енергії:

$$\eta_{ТЕЦ}^{ЕЛ БР} = \frac{W_{ВИР}}{B_{ЕЛ} \cdot Q_H^P},$$

де $B_{ЕЛ} = B - B_T$ – витрата палива, віднесена умовно на частку електричної енергії, кг/год; B_T – витрата палива, віднесена умовно на частку теплоти, кг/год; $W_{ВИР}$ – кількість виробленої електричної енергії (кДж/год).

ККД ТЕЦ брутто за відпущеною теплотою $Q_{ВІД}$:

$$\eta_{ТЕЦ}^{T БР} = \frac{Q_{ВД}}{B_T \cdot Q_H^P}.$$

ККД ТЕЦ нетто по виробництву електричної енергії:

$$\eta_{ТЕЦ}^{ЕЛ НЕТТО} = \frac{W_{ВД}}{(B_{ЕЛ} - B_{ВЛП}) \cdot Q_H^P},$$

де $W_{ВД} = W_{ВИР} - W_{ВЛП}$ - кількість відпущеної електричної енергії (кДж/год);

$B_{ВЛП}$ - витрата палива на вироблення електроенергії для власних потреб, яка використовується у зв'язку з відпущенням теплоти (кДж/год).

ККД ТЕЦ нетто за відпущеною теплотою:

$$\eta_{ТЕЦ}^{T НЕТТО} = \frac{Q_{ВД}}{(B_T + B_{ВЛП}) \cdot Q_H^P}.$$

Витрати палива на виробництво 1 кВт·год електричної енергії:

$$b_{ТЕЦ}^{ЕЛ} = \frac{B_{ЕЛ}}{W_{ВИР}} = \frac{3600}{\eta_{ТЕЦ}^{ЕЛ} \cdot Q_H^P}, \quad (\text{кг/кВт·год}).$$

Витрати палива на виробництво 1 ГДж теплоти:

$$b_{ТЕЦ}^T = \frac{B_T}{Q_{ВД}} = \frac{10^6}{Q_H^P \cdot \eta_{ТЕЦ}^T}, \quad (\text{кг/ГДж}).$$

Задача 6.1 Визначити к.к.д. КЕС брутто, якщо $\eta_{КУ} = 0,89$, $\eta_{ТР} = 0,97$, $\eta_{Оі} = 0,84$, $\eta_{М} = 0,98$, $\eta_{Г} = 0,98$, а початкові параметри пари перед турбіною $p_1 = 9 \text{ МПа}$, $t_1 = 550^\circ\text{C}$ і тиск пари в конденсаторі $p_K = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

$$\eta_{КУ} = 0,89,$$

$$\eta_{ТР} = 0,97,$$

$$\eta_{Оі} = 0,84,$$

$$\eta_{М} = 0,98,$$

$$\eta_{Г} = 0,98,$$

$$p_1 = 9 \text{ МПа},$$

$$t_1 = 550^\circ\text{C},$$

$$p_K = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$\eta_{КЕС}^{бр} = ?$$

1. За $h - s$ діаграмою за значеннями p_1 і t_1 знайдемо:

$$h_1 = 3510 \text{ кДж/кг}, h_2 = 2056 \text{ кДж/кг},$$

За таблицею (Додаток 3) знаходимо значення $h_2' = 121,33 \text{ кДж/кг}$.

2. Визначимо термічний к.к.д. циклу

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = \frac{3510 - 2056}{3510 - 121,33} = 0,43.$$

3. К.к.д. КЕС дорівнює:

$$\eta_{КЕС}^{бр} = \eta_{КУ} \cdot \eta_{ТР} \cdot \eta_{Оі} \cdot \eta_{М} \cdot \eta_{Г} \cdot \eta_t = 0,89 \cdot 0,97 \cdot 0,84 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,43 = 0,3.$$

Задача 6.2 КЕС виробила електроенергії $W^{ВІР} = 30,2 \cdot 10^{10}$ кДж/рік. Визначити річну витрату палива, якщо відома питома витрата палива на виробництво 1 МДж електроенергії $b_{КЕС}^{УМ} = 0,109$ кг/МДж і тепловий еквівалент палива, яке спалюється на КЕС, дорівнює $E = 0,84$.

$W_{ВІР} = 30,2 \cdot 10^{10}$ кДж/рік $b_{КЕС}^{УМ} = 0,109$ кг/МДж $E = 0,84$ <hr/> В - ?	1. Визначимо Q_H^P палива, що спалюється на КЕС. $E = \frac{Q_H^P}{Q_{УМ}} \rightarrow Q_H^P = E \cdot Q_{УМ} = 0,84 \cdot 29300 =$ $= 24612 \text{ кДж/кг}$
--	---

2. Річна витрата палива визначається з рівняння:

$$b_{КЕС}^{УМ} = \frac{B Q_H^P}{29,3 W_{ВІР}} \rightarrow B = \frac{b_{КЕС}^{УМ} \cdot 29,3 \cdot W_{ВІР}}{Q_H^P} = \frac{0,109 \cdot 29,3 \cdot 30,2 \cdot 10^{10}}{24,612} = 3,92 \cdot 10^7 \text{ кг/рік.}$$

Задача 6.3 Визначити питому витрату теплоти на виробництво 1 МДж електроенергії (для умовного палива) для КЕС, якщо на ній встановлено 3 турбогенератори потужністю $N = 75 \cdot 10^3$ кВт кожний з коефіцієнтом використання встановленої потужності $k_B = 0,64$. Станція витратила $B = 670 \cdot 10^6$ кг/рік кам'яного вугілля з $Q_H^P = 20500$ кДж/кг.

3 по $75 \cdot 10^3$ кВт $k_B = 0,64$ $B = 670 \cdot 10^6$ кг/рік $Q_H^P = 20500$ кДж/кг <hr/> $d_{КЕС}$ - ?	1. Встановлена потужність КЕС: $N_{КЕС}^y = 3 \cdot N = 3 \cdot 75 \cdot 10^3 = 225 \cdot 10^3 \text{ кВт.}$ 2. Кількість виробленої за рік енергії визначаємо за формулою: $W_{ВІР} = 8760 \cdot K_B \cdot N_{КЕС}^y = 8760 \cdot 0,64 \cdot 225 \cdot 10^3 =$ $= 1,26 \cdot 10^9 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік} = 4,536 \cdot 10^{12} \text{ кДж/рік.}$
--	---

3. ККД КЕС брутто:

$$\eta_{КЕС}^{БР} = \frac{W_{ВІР}}{B \cdot Q_H^P} = \frac{4,536 \cdot 10^{12}}{670 \cdot 10^6 \cdot 20500} = 0,33.$$

4. Питома витрата теплоти на виробництво 1 МДж електроенергії (для умовного палива):

$$d_{КЕС} = \frac{1}{\eta_{КЕС}^{БР}} = \frac{1}{0,33} = 3,03 \text{ МДж/МДж.}$$

Задача 6.4 ТЕЦ використала $V_{\text{ТЕЦ}} = 94 \cdot 10^6$ кг/рік кам'яного вугілля з $Q_H^P = 24700$ кДж/кг, виробила $W_{\text{ВИР}} = 61 \cdot 10^{10}$ кДж/рік електроенергії і відпустила теплоти зовнішнім споживачам $Q_{\text{ВІД}} = 4,4 \cdot 10^{11}$ кДж/рік. Визначити к.к.д. ТЕЦ брутто по виробництву електроенергії і теплоти, якщо витрата палива на виробництво відпущеної теплоти складає $V_T = 23 \cdot 10^6$ кг/рік.

$V_{\text{ТЕЦ}} = 94 \cdot 10^6$ кг/рік $Q_H^P = 24700$ кДж/кг $W_{\text{ВИР}} = 61 \cdot 10^{10}$ кДж/рік $Q_{\text{ВІД}} = 4,4 \cdot 10^{11}$ кДж/рік $V_T = 23 \cdot 10^6$ кг/рік	<p>1. Визначимо кількість витраченого палива на виробництво електроенергії з рівняння:</p> $V_{\text{ТЕЦ}} = V_{\text{ЕЛ}} + V_T,$ $V_{\text{ЕЛ}} = V_{\text{ТЕЦ}} - V_T = 94 \cdot 10^6 - 23 \cdot 10^6 = 71 \cdot 10^6 \text{ кг/рік.}$ <p>2. Визначаємо к.к.д. брутто по виробництву електроенергії:</p> $\eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{ЕЛ БР}} = \frac{W_{\text{ВИР}}}{V_{\text{ЕЛ}} \cdot Q_H^P} = \frac{61 \cdot 10^{10}}{71 \cdot 10^6 \cdot 24700} = 0,348.$
$\eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{Е БР}} - ? \quad \eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{Т БР}} - ?$	

3. Визначаємо к.к.д. брутто по виробництву теплоти

$$\eta_{\text{ТЕЦ}}^{\text{Т БР}} = \frac{Q_{\text{ВІД}}}{V_T \cdot Q_H^P} = \frac{4,4 \cdot 10^{11}}{23 \cdot 10^6 \cdot 24700} = 0,775.$$

Задача 6.5 ТЕЦ витратила $V_{\text{ТЕЦ}} = 78 \cdot 10^6$ кг/рік палива, виробила при цьому $W_{\text{ВИР}} = 54 \cdot 10^{10}$ кДж/рік електроенергії і віддала теплоти зовнішнім споживачам $Q_{\text{ВІД}} = 3,36 \cdot 10^{11}$ кДж/рік. Визначити питому витрату умовного палива на виробництво 1 МДж електроенергії і 1 МДж теплоти, якщо тепловий еквівалент спалюваного на ТЕЦ палива $E = 0,9$ і $\eta_{\text{КУ}} = 0,89$.

$V_{\text{ТЕЦ}} = 78 \cdot 10^6$ /рік $W_{\text{ВИР}} = 54 \cdot 10^{10}$ кДж/рік $Q_{\text{ВІД}} = 3,6 \cdot 10^{11}$ кДж/рік $E = 0,9$ $\eta_{\text{КУ}} = 0,89$	<p>1. Визначимо Q_H^P палива:</p> $E = \frac{Q_H^P}{Q_{\text{УМ}}} \Rightarrow Q_H^P = 0,9 \cdot 29,33 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}.$ <p>2. Витрата палива на вироблення відпущеної теплоти:</p> $V_T = \frac{Q_{\text{ВІД}}}{Q_H^P \cdot \eta_{\text{КУ}}} = \frac{3,36 \cdot 10^{11}}{26397 \cdot 0,89} = 1,43 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{рік}}.$
$b_{\text{Е ТЕЦ}}^{\text{УМ}} - ? \quad b_{\text{Т ТЕЦ}}^{\text{УМ}} - ?$	

3. Витрата палива на вироблення електричної енергії:

$$B_E = B_{TEЦ} - B_T = 78 \cdot 10^6 - 1,43 \cdot 10^7 = 6,37 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{рік}}.$$

4. Умовна витрата палива на виробництво 1 МДж електроенергії:

$$b_{EЛ TEЦ}^{YM} = \frac{B_{EЛ} \cdot Q_H^P}{29,33 \cdot W_{BIP}} = \frac{6,37 \cdot 10^7 \cdot 26397}{29330 \cdot 54 \cdot 10^{10}} = 0,106 \left[\frac{\text{кг}}{\text{МДж}} \right].$$

5. Умовна витрата палива на 1 МДж теплоти:

$$b_{T TEЦ}^{YM} = \frac{B_T \cdot Q_H^P}{29,33 \cdot Q_{BID}} = \frac{1,43 \cdot 10^7 \cdot 0,9}{3,36 \cdot 10^{11}} = 0,0383 \left[\frac{\text{кг}}{\text{МДж}} \right].$$

Задача 6.6 Визначити питому витрату палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії для КЕС з 3-ма турбогенераторами потужністю $N = 50 \cdot 10^3$ кВт кожний і з числом годин використання встановленої потужності $T_B = 5000$ год /рік, якщо станція використала $B = 305 \cdot 10^6$ кг/рік кам'яного вугілля з нижчою теплотою згорання $Q_H^P = 28300$ кДж/кг.

$N = 50 \cdot 10^3 \text{ кВт}$	1. Кількість виробленої електроенергії в рік:
$n = 3$	$W_{BIP} = T_B \cdot N \cdot n = 3 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 5000 = 7,5 \cdot 10^8 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}.$
$B = 305 \cdot 10^6 \text{ кг/рік}$	2. Питома витрата палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії:
$Q_H^P = 28300 \text{ кДж/кг}$	
$T_B = 5000 \text{ год/рік}$	$b_{KEC}^{YM} = \frac{B \cdot Q_H^P}{29,33 \cdot W_{BIP}} = \frac{305 \cdot 10^6 \cdot 28300}{29330 \cdot 7,5 \cdot 10^8} = 0,393 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}}.$
$b_{KEC}^{YM} - ? \left[\frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{год}} \right]$	

Задача 6.7 ТЕЦ виробила $W_{BIP} = 48 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{рік}}$ електроенергії і відпустила теплоти зовнішнім споживачам $Q_{BID} = 42 \cdot 10^{10}$ кДж/рік. Визначити коефіцієнт використання теплоти палива на ТЕЦ, якщо теплота згорання палива $Q_H^P = 15800$ кДж/кг, витрата пари з котлів $D = 61,5 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{рік}}$ і випарна здатність палива $H = 8,2$ кг пари /кг палива.

$W_{ВІР} = 48 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{рік}}$ $Q_{ВІД} = 42 \cdot 10^{10} \frac{\text{кДж}}{\text{рік}}$ $Q_H^P = 15800 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ $D = 61,5 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$ $H = 8,2 \text{ кг пари /кг палива}$ <hr/> $\eta_{ТЕЦ} - ?$	$\eta_{ТЕЦ} = \frac{Q_{ВІД} + W_{ВІР}}{B_{ТЕЦ} \cdot Q_H^P}$ $B_{ТЕЦ} = \frac{D}{H} = \frac{61,5 \cdot 10^7}{8,2} = 7,5 \cdot 10^7 \text{ кг/рік.}$ $\eta_{ТЕЦ} = \frac{Q_{ВІД} + W_{ВІР}}{B_{ТЕЦ} \cdot Q_H^P} = \frac{48 \cdot 10^{10} + 42 \cdot 10^{10}}{7,5 \cdot 10^7 \cdot 15800} = 0,76.$
---	---

Задача 6.8 КЕС виробила електроенергії $W_{ВІР} = 100 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$, витратила на особисті потреби 5% від виробленої енергії. Визначити собівартість 1 кВт · год відпущеної електроенергії, якщо сума витрат на станції $\sum S = 7,6 \cdot 10^5 \text{ грн/рік}$.

$W_{ВІР} = 100 \cdot 10^6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{рік}}$ $5\% \cdot W_{ВІР} - \text{на власні потреби}$ $\sum S = 7,6 \cdot 10^5 \text{ грн/рік}$ <hr/> $S_{КЕС}^{ВІД} - ?$	$S_{КЕС}^{ВІД} = \frac{\sum S}{W_{ВІД}}$ $W_{ВІД} = (1 - 0,05) \cdot W_{ВІР} = 0,95 \cdot W_{ВІР} = 95 \cdot 10^6 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$ $S_{КЕС}^{ВІД} = \frac{\sum S}{W_{ВІД}} = \frac{7,6 \cdot 10^5}{95 \cdot 10^6} = 0,8 \text{ коп/кВт} \cdot \text{год.}$
--	--

Задача 6.9 ТЕЦ витратила $B_{ТЕЦ} = 92 \cdot 10^6 \text{ кг/рік}$ кам'яного вугілля з нижчою теплою згоряння $Q_H^P = 27500 \text{ кДж/кг}$, виробивши при цьому $W_{ВІР} = 64 \cdot 10^{10} \text{ кДж/рік}$ електроенергії і відпустивши теплоти $Q_{ВІД} = 4,55 \cdot 10^{11} \text{ кДж/рік}$ зовнішнім споживачам.

Визначити ККД ТЕЦ бруто і нетто по виробництву електроенергії і теплоти, якщо витрата електроенергії на власні потреби 6% від виробленої енергії, ККД котельної установки $\eta_{к.у} = 0,87$ і витрата палива на вироблення електроенергії для власних потреб, яка використовується у зв'язку з відпущенням теплоти $B_{ВЛП} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ кг/рік}$.

Визначити питомі витрати умовного палива на вироблення 1 МДж електроенергії і 1 МДж теплоти.

$B_{TEЦ} = 92 \cdot 10^6 \text{ кг / рік}$	1. Витрата палива на вироблення відпущеної теплоти, кг / рік:
$Q_H^P = 27500 \text{ кДж / кг}$	
$W^{BIP} = 64 \cdot 10^{10} \text{ кДж / рік}$	$B_T = \frac{Q_{BID}}{\eta_{KY} \cdot Q_H^P} = \frac{4,55 \cdot 10^{11}}{0,87 \cdot 27500} = 19 \cdot 10^6 \text{ кг / рік}$
$Q^{BID} = 4,55 \cdot 10^{11} \text{ кДж / рік}$	2. Витрата палива на вироблення електроенергії, кг / рік:
$\eta_{KY} = 0,87$	$B_{EЛ} = B_{TEЦ} - B_T = 92 \cdot 10^6 - 19 \cdot 10^6 = 73 \cdot 10^6 \text{ кг / рік}$
$B_{B.П} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ кг / рік}$	3. ККД ТЕЦ бруто по виробленню електроенергії:
$\eta_{TEЦ}^{EЛ BП} - ? \quad \eta_{TEЦ}^{T BП} - ?$	$\eta_{TEЦ}^{EЛ BП} = \frac{W^{BIP}}{B_{EЛ} Q_H^P} = \frac{64 \cdot 10^{10}}{73 \cdot 10^6 \cdot 27500} = 0,3188$
$\eta_{TEЦ}^{EЛ HETTO} - ? \quad \eta_{TEЦ}^{T HETTO} - ?$	
$b_{E TEЦ}^{YM} - ? \quad b_{T TEЦ}^{YM} - ?$	4. ККД ТЕЦ бруто по виробництву теплоти:
	$\eta_{TEЦ}^{T BП} = \frac{Q_{BID}}{B_T Q_H^P} = \frac{4,55 \cdot 10^{11}}{19 \cdot 10^6 \cdot 27500} = 0,87$
	5. Кількість відпущеної електроенергії, кДж / год:
	$W^{BID} = W^{BIP} - W^{BЛ.П.}; W^{BID} = 64 \cdot 10^{10} - 3,84 \cdot 10^{10} = 60,16.$
	$W^{BЛ.П.} = W^{BIP} \cdot 0,06 = 64 \cdot 10^{10} \cdot 0,06 = 3,84 \cdot 10^{10}.$
	6. ККД ТЕЦ нетто з відпуску електроенергії
	$\eta_{TEЦ}^{EЛ HETTO} = \frac{W_{BID}}{(B_{EЛ} - B_{BЛП}) Q_H^P} = \frac{60,16 \cdot 10^{10}}{(73 \cdot 10^6 - 4,55 \cdot 10^6) \cdot 27500} = 0,3196$
	7. ККД ТЕЦ нетто з відпуску теплоти:
	$\eta_{TEЦ}^{T HETTO} = \frac{Q_{BID}}{(B_T + B_{BЛП}) \cdot Q_H^P} = \frac{4,55 \cdot 10^{11}}{(19 \cdot 10^6 + 4,5 \cdot 10^6) \cdot 27500} = 0,704$
	8. Питома витрата умовного палива на вироблення 1МДж електроенергії, кг/МДж
	$b_{TEЦ}^{EЛ YM} = \frac{B_{EЛ} Q_H^P}{29,3 \cdot W_{BIP}} = \frac{73 \cdot 10^6 \cdot 27500}{29,3 \cdot 64 \cdot 10^{10}} = 0,107$
	9. Питома витрата умовного палива на вироблення 1МДж теплоти
	$b_{TEЦ}^{T YM} = \frac{B_T Q_H^P}{29,3 \cdot Q_{BID}} = \frac{19 \cdot 10^6 \cdot 27500}{29,3 \cdot 4,55 \cdot 10^{11}} = 0,0391$

ЛІТЕРАТУРА

1. *Шкляр В.І.* Джерела енергії: підручник / В.І. Шкляр, В.В. Дубровська – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 337 с.
2. *Драганов Б. Х.* Теплотехніка : підручник / Б. Х. Драганов, А. А. Долінський, А. В. Міщенко, Є. М. Письменний. – Київ: «ІНК ОС», 2005. – 504 с.
3. *Панкратов Г.П.* Сборник задач по общей теплотехнике. Москва. "Высшая школа", 1986, - 248 с.
4. *Рывкин С.Л., Александров А.А.* Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.

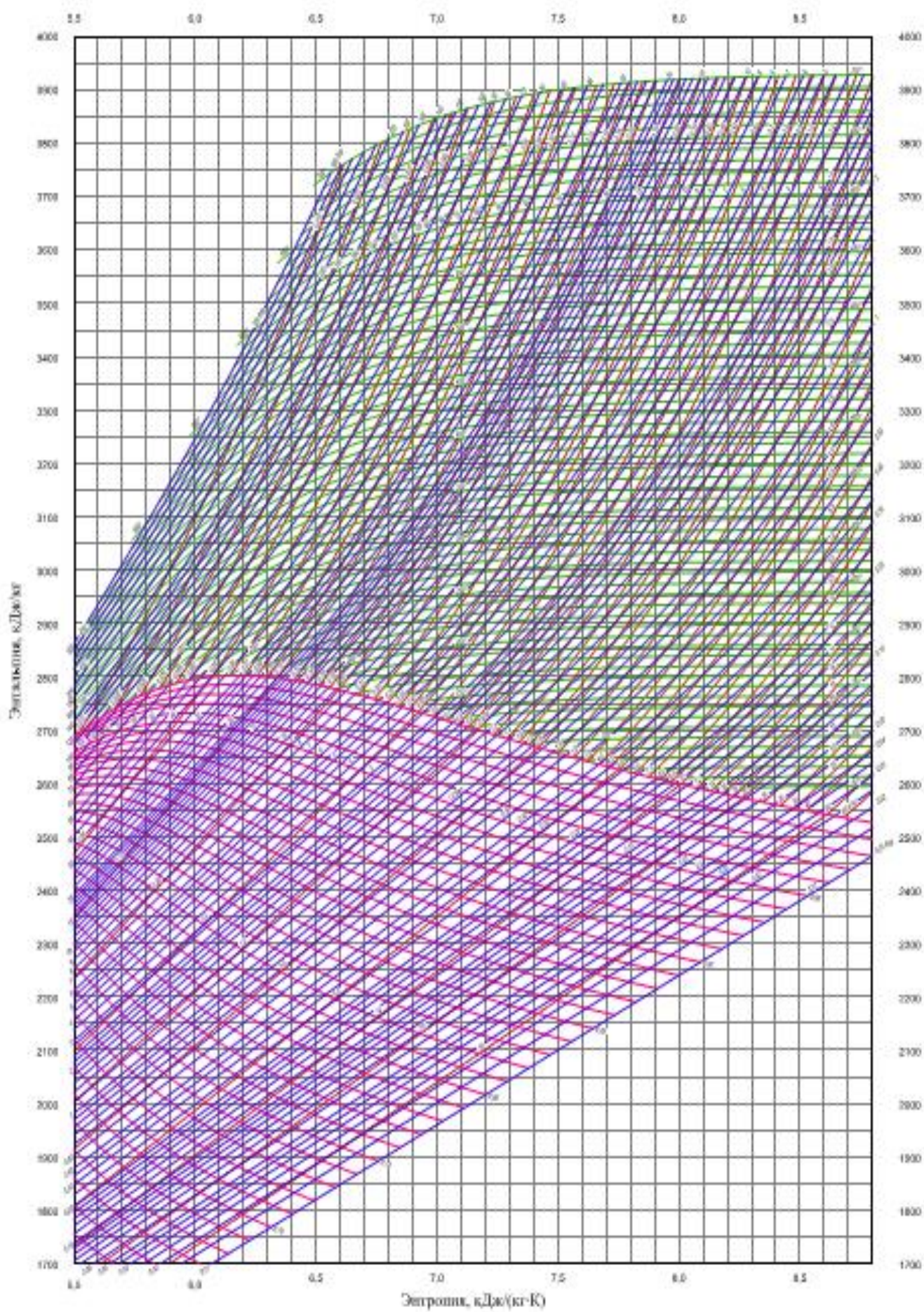
ДОДАТОК 1 Теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання палива

Позначення	Тверде та рідке паливо	Газоподібне паливо
Теоретична об'ємна витрата повітря при повному спалюванні палива, $\alpha = 1$:		
V^0	$\text{м}^3/\text{кг}$	$\text{м}^3/\text{м}^3$
	$0,0889\left(C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P\right) + 0,265 \cdot H^P - 0,0333 \cdot O^P$	$0,0478\left[0,5H_2 + 0,5CO + 1,5H_2S + \sum\left(m + \frac{n}{4}\right)C_mH_n - O_2\right]$
Об'єм продуктів згорання, що утворюються при спалюванні палива		
V_{Γ}	$V_{\Gamma} = V_{\text{C.Г}} + V_{\text{H}_2\text{O}}$	
Об'єм сухих газів		
$V_{\text{C.Г.}}$	$V_{\text{RO}_2} + V_{\text{R}_2}$	
$\alpha = 1$ (стехіометричне згорання)		
Триатомні гази		
$V_{\text{RO}_2} =$ $= V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}$	$0,01866\left(C^P + 0,375 \cdot S_{\text{Л}}^P\right)$	$0,01\left(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum mC_mH_n\right)$
Двоатомні гази		
$V_{\text{R}_2}^0 = V_{\text{N}_2}^0$	$0,79 \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^P$	$0,79 \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2$
Водяна пара		
$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{H}_2} +$ $+ V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{W}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{ПОВ}}$	$0,0124\left(9H^P + W^P\right) + 0,0161 \cdot V^0$	$0,01\left(H_2 + \text{H}_2\text{S} + 0,124d + \sum \frac{n}{2}C_mH_n\right) + 0,0161V^0$, де $d=10 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ – вологовміст газоподібного палива
Об'єм сухих газів при $\alpha_{\text{T}}=1$		
$V_{\text{C.Г.}}^0$	$V_{\text{RO}_2} + V_{\text{R}_2}^0$	

Продовження таблиці

Об'єм сухих газів при $\alpha > 1$		
$V_{C.G.}$	$V_{C.G.}^0 + (\alpha - 1)V^0$	
Водяна пара		
V_{H_2O}	$V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0$	
Надлишковий кисень		
V_{O_2}	$0,21(\alpha - 1)V^0$	
Азот		
V_{N_2}	$0,79 \cdot \alpha \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^P$	$0,79 \cdot \alpha \cdot V^0 + N_2 / 100$
Двоатомні гази		
$V_{R_2} = V_{O_2} + V_{N_2}$	$(\alpha - 0,21) \cdot V^0 + 0,008 \cdot N^P$	$(\alpha - 0,21) \cdot V^0 + 0,01 \cdot N_2$
Ентальпія продуктів згорання		
H_{Γ}	кДж/кг	кДж/м ³
	$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)H_{\text{ПОВ}}^0 + H_3; \quad H_{\Gamma}^0 = V_{RO_2}(c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0(c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0(c\vartheta)_{H_2O}$ $H_{\text{ПОВ}}^0 = V^0(c\vartheta)_{\text{ПОВ}} \quad H_3 = \frac{A^P a_{yH}}{100}(c\vartheta)_3 \quad (c\vartheta) - \left[\frac{\text{кДж}}{\text{м}^3} \right] - \text{ентальпія газів}$	
Теплота згорання		
Q_H^P	МДж/кг	МДж/м ³
	$Q_H^P = 0,338C^P + 1,025H^P - 0,1085(O^P - S_{\text{л}}^P) - 0,025W^P$	$Q_H^P = 0,3581CH_4 + 0,6374C_2H_6 + 1,135C_3H_8 +$ $+ 1,1862C_4H_{10} + 1,461C_5H_{12} + 0,108H_2 +$ $+ 0,1263CO + 0,234H_2S$

ДОДАТОК 2 h-s діаграма води і водяної пари



ДОДАТОК 3 Термодинамічні властивості води та водяної пари в стані насичення (за температурами) [4]

t	p	v'	v''	h'	h''	г	s'	s''
°C	кПа	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0	0,6108	0,0010002	206,32	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
1	0,6566	0,0010002	192,61	4,17	2502,8	2498,6	0,0152	9,1298
2	0,7054	0,0010001	179,94	8,39	2504,7	2496,3	0,0306	9,1035
3	0,7575	0,0010001	168,17	12,60	2506,5	2493,9	0,0459	9,0773
4	0,8129	0,0010000	157,27	16,80	2508,3	2491,5	0,0611	9,0514
5	0,8718	0,0010000	147,17	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
6	0,9346	0,0010000	137,768	25,21	2512,0	2486,8	0,0913	9,0003
7	1,0012	0,0010001	129,061	29,41	2513,9	2484,5	0,1063	8,9751
8	1,0721	0,0010001	120,952	33,60	2515,7	2482,1	0,1213	8,9501
9	1,1473	0,0010002	113,423	37,80	2517,5	2479,7	0,1362	8,9254
10	1,2271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
11	1,3118	0,0010003	99,896	46,19	2521,2	2475,0	0,1658	8,8766
12	1,4015	0,0010004	93,828	50,38	2523,0	2472,6	0,1805	8,8525
13	1,4967	0,0010006	88,165	54,57	2524,9	2470,2	0,1952	8,8286
14	1,5974	0,0010007	82,893	58,75	2526,7	2467,9	0,2098	8,8050
15	1,7041	0,0010008	77,970	62,94	2528,6	2465,7	0,2243	8,7815
16	1,8170	0,0010010	73,376	67,13	2530,4	2463,3	0,2388	8,7583
17	1,9364	0,0010012	69,087	71,31	2532,2	2460,9	0,2533	8,7353
18	2,0626	0,0010013	65,080	75,50	2534,0	2458,5	0,2677	8,7125
19	2,1960	0,0010015	61,334	79,68	2535,9	2456,2	0,2820	8,6898
20	2,3368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674

t – температура, °C	p – тиск, Па;	v – питомий об'єм, м ³ /кг;
h – питома ентальпія, кДж/кг;	г – питома теплота пароутворення, кДж/кг;	s – питома ентропія, кДж/(кг·К);
' – кипляча рідина;	'' – суха насичена пара.	

Продовження таблиці

t	p	v'	v''	h'	h''	г	s'	s''
129	262,13	0,0010690	0,68760	542,0	2719,3	2177,3	1,6238	7,0382
130	270,12	0,0010700	0,66851	546,3	2720,7	2174,4	1,6344	7,0281
131	278,30	0,0010710	0,65007	550,6	2722,1	2171,5	1,6449	7,0181
132	286,68	0,0010720	0,63223	554,8	2723,4	2168,6	1,6555	7,0082
133	295,27	0,0010730	0,61498	559,1	2724,8	2165,7	1,6660	6,9983
134	304,06	0,0010740	0,59827	563,4	2726,1	2162,7	1,6765	6,9885
135	313,06	0,0010750	0,58212	567,7	2727,4	2159,7	1,6869	6,9787
136	322,27	0,0010760	0,56649	572,0	2728,8	2156,8	1,6974	6,9690
137	331,71	0,0010770	0,55134	576,2	2730,1	2153,9	1,7078	6,9594
138	341,37	0,0010780	0,53670	580,5	2731,4	2150,9	1,7182	6,9498
139	351,25	0,0010790	0,52249	584,8	2732,7	2147,9	1,7286	6,9402
140	361,36	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
141	371,70	0,0010811	0,49544	593,4	2735,2	2141,8	1,7493	6,9212
142	382,28	0,0010822	0,48255	597,7	2736,5	2138,8	1,7597	6,9118
143	393,11	0,0010832	0,47004	602,0	2737,8	2135,8	1,7700	6,9024
144	404,18	0,0010843	0,45792	606,3	2739,0	2132,7	1,7803	6,8931
145	415,50	0,0010853	0,44618	610,6	2740,3	2129,7	1,7906	6,8838
146	427,07	0,0010864	0,43480	614,9	2741,5	2126,6	1,8008	6,8746
147	438,90	0,0010875	0,42376	619,2	2742,7	2123,5	1,8110	6,8654
148	450,99	0,0010886	0,41306	623,5	2743,9	2120,4	1,8213	6,8563
149	463,34	0,0010897	0,40269	627,8	2745,1	2117,3	1,8315	6,8472
150	475,97	0,0010908	0,39261	632,2	2746,3	2114,1	1,8416	6,8381
151	488,87	0,0010919	0,38284	636,5	2747,5	2111,0	1,8518	6,8291
152	502,05	0,0010930	0,37337	640,8	2748,7	2107,9	1,8619	6,8201
153	515,52	0,0010941	0,36416	645,1	2749,8	2104,7	1,8721	6,8112
154	529,26	0,0010953	0,35524	649,5	2751,0	2101,5	1,8822	6,8023
155	543,31	0,0010964	0,34656	653,8	2752,1	2098,3	1,8923	6,7934

ДОДАТОК 4 Термодинамічні властивості води та водяної пари в стані насичення (за тиском) [4]

p	t	v'	v''	h'	h''	Г	s'	s''
кПа	°С	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
1	13,034	0,0010006	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278
1,5	17,511	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
2,0	19,029	0,0010015	61,229	79,80	2535,9	2456,1	0,2824	8,6892
2,2	20,431	0,0010018	56,392	85,67	2538,5	2452,8	0,3024	8,6578
2,4	21,094	0,0010020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
2,5	21,735	0,0010021	52,282	91,12	2540,9	2449,8	0,3210	8,6290
2,6	22,953	0,0010024	48,745	96,21	2543,1	2446,9	0,3382	8,6024
2,8	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
3,0	25,178	0,0010029	42,967	105,51	2547,2	2441,7	0,3695	8,5545
3,2	26,200	0,0010032	40,575	109,78	2549,0	2439,2	0,3838	8,5327
3,4	26,692	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
3,5	27,172	0,0010035	38,443	113,84	2550,8	2437,0	0,3973	8,5123
3,6	28,097	0,0010037	36,530	117,71	2552,5	2434,8	0,4102	8,4930
3,8	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
4,0	29,828	0,0010043	33,237	124,94	2555,6	2430,7	0,4341	8,4573
4,2	30,640	0,0010045	31,810	128,34	2557,1	2428,8	0,4453	8,4407
4,4	31,034	0,0010046	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327
4,5	31,420	0,0010048	30,503	131,60	2558,5	2426,9	0,4560	8,4249
4,6	32,172	0,0010050	29,303	134,74	2559,9	2425,2	0,4663	8,4097
4,8	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
5,0	33,60	0,0010055	27,172	140,70	2562,4	2421,7	0,4858	8,3813
5,2	34,27	0,0010057	26,222	143,52	2563,6	2420,1	0,4950	8,3678

Продовження таблиці

p	t	v'	v''	h'	h''	г	s'	s''
380	141,79	0,0010819	0,48527	596,8	2736,2	2139,4	1,7575	6,9138
390	142,72	0,0010829	0,47357	600,8	2737,4	2136,6	1,7670	6,9051
400	143,62	0,0010839	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
410	144,52	0,0010848	0,45181	608,5	2739,7	2131,2	1,7856	6,8883
420	145,39	0,0010858	0,44168	612,3	2740,7	2128,4	1,7946	6,8802
430	146,25	0,0010867	0,43201	616,0	2741,8	2125,8	1,8034	6,8723
440	147,09	0,0010876	0,42276	619,6	2742,8	2123,2	1,8120	6,8645
450	147,92	0,0010885	0,4139	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
460	148,73	0,0010894	0,40544	626,7	2744,8	2118,1	1,8287	6,8496
470	149,53	0,0010903	0,39731	630,1	2745,8	2115,7	1,8368	6,8424
480	150,31	0,0010911	0,38950	633,5	2746,7	2113,2	1,8448	6,8352
490	151,09	0,0010920	0,38202	636,8	2747,6	2110,8	1,8527	6,8283
500	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
520	153,33	0,0010945	0,36120	646,5	2750,2	2103,7	1,8754	6,8083
540	154,77	0,0010961	0,34857	652,8	2751,9	2099,1	1,8899	6,7955
550	155,47	0,0010969	0,34259	655,8	2752,7	2096,9	1,8970	6,7893
560	156,16	0,0010977	0,33681	658,8	2753,4	2094,6	1,9040	6,7832
580	157,52	0,0010993	0,32583	664,7	2755,0	2090,3	1,9176	6,7713
600	158,84	0,0011009	0,31566	670,4	2756,4	2086,0	1,9368	6,7598
620	160,12	0,0011024	6,30593	676,0	2757,8	2081,8	1,9437	6,7487
640	161,38	0,0011039	0,29689	681,5	2759,2	2077,7	1,9562	6,7379
650	161,99	0,0011046	0,29257	684,2	2759,9	2075,7	1,9623	6,7326
660	162,60	0,0011053	0,28837	686,8	2760,5	2073,7	1,9684	6,7274
680	163,79	0,0011068	0,28033	692,0	2761,7	2069,7	1,9803	6,7173
700	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074